
Konzept und Umsetzung einer Online-Messdatendiagnose an Motorenprüfständen

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Flohr
aus Zweibrücken

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Tropea
Tag der Einreichung:	07.09.2005
Tag der mündlichen Prüfung:	01.11.2005

Darmstadt 2005

D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Universität Darmstadt.

Die Arbeit, ursprünglich als Eigenentwicklung entworfen, fand mit der Volkswagen AG bald einen Industriepartner, der an einer industriellen Lösung dieser Thematik interessiert war. So liegt der Fokus dieser Arbeit nicht nur in theoretischen Gedankengebäuden, als vielmehr auch in praktischen und direkt umsetzbaren Lösungsalgorithmen zur Sicherung und Steigerung der Messdatenqualität an Motorenprüfständen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg danke ich für die Anregungen und fachliche Unterstützung zu dieser Arbeit sowie für die gewährte Selbstständigkeit bei deren Durchführung.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Tropea für die Übernahme des Koreferates.

Ein weiterer Dank gilt der Volkswagen AG, dort insbesondere Herrn Dr.-Ing. Hanno Ihme-Schramm für die fachliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit mit dem Ergebnis der Installation der Arbeiten im Prüffeld des Werkes Wolfsburg.

Darmstadt, den 24.08.2005

Andreas Flohr

Abstract

Modern combustion engines from the personnel and commercial vehicle sector require a continuously increasing amount of testing for achieving the targets exhaust emission, drivability and fuel consumption. The reason is the similarly increasing number of actors, which influence the behavior of the engine and which are the basis for the further going progress in the development of combustion engines.

The complexity of the necessary measuring devices and the huge number of sensors result in a situation, where the test-bed engineer is not able to check and verify the whole amount of data.

At the same time, alternative measurement strategies become more and more common. DoE, the Design of Experiments, effects that measurement points are driven randomly distributed. Even a well versed test-bed engineer has no real chance to prove the data online, while the measurement points are driven in that way.

The result of these changes in the engine development process is an increase in faulty measurements, higher test-bed costs and a poor efficiency of the testing facilities.

With help of this approach, these difficulties should be minimized and a quality insurance introduced in the testing procedure.

A testing program, which is supplied online with the actual measurement data, observes them for eventually existing mismatches. An error message is signaled and plotted in a text file in the case of detected mismatches.

The work can be subdivided in two main parts, namely the fault detection (FD) and the fault isolation (FI). The detection is based on an extensive collection of single methods, which describe a certain characteristic of the engine. These methods include limit value observations, thermodynamic equations, comparisons of specified values and measurement based polynomial models, if their generality could be demonstrated on several different engine-types.

The function of the fault isolation process is the analysis, which of the measurement channels has been responsible for the eventually detected conspicuousness. Thereby, two completely different approaches come into use. The first is a logical technique based on mathematical correction numbers, the other is a probability based method in combination with expert knowledge. This expert knowledge is fixed by weighting all used channels corresponding to their influence in the single methods.

The developed concept differs clearly from comparable works in the field of fault diagnosis. Fault analysis developments are mostly used only for well known systems, which have been analyzed and measured in a detailed way. Examples are the OBD (On Board Diagnose) in the engine control unit and most other applications in the field of monitoring.

In contrast, modern test-beds systems make a change from one engine to another in several minutes possible. The engines dwell time on such a test-bed varies from one day to several weeks. With every change of the engine, most of the measuring devices are changed too. The knowledge about the specific engine and the adapted sensors is limited. Therefore, a detailed and time-consuming parameterization can not be the solution to make the models run. The program itself must figure out and

conclude from the existing measurement channels, which models will work and are convenient to realize a fault diagnosis.

The existing paper includes the description of the necessary aspects which are needed in such a program. Furthermore, some of the used plausibility checks and the two isolation methods are described.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Darmstadt, den 7.9.2005

A. Flohr

Inhaltsverzeichnis:

1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung / Motivation.....	2
3 Stand der Technik	4
3.1 Offline-Diagnose von Messdaten	4
3.1.1 XT-Plots, Scatterplots.....	5
3.1.2 Residuenbetrachtung	7
3.2 On Board Diagnose	8
3.2.1 Luftmassensensor	9
3.2.2 Lambdasonde	9
3.2.3 Abgasrückführung (AGR)	10
3.2.4 Zündaussetzererkennung.....	11
3.2.5 Bewertung der OBD-Strategien als Basis für die Prüfstandsdiagnose	11
3.3 Parameterschätzverfahren.....	12
3.3.1 Paritätsgleichungen.....	13
3.4 Bisherige Ansätze an Motorprüfständen	16
3.5 Bewertung der Verfahren.....	16
4 Zusammenstellung der notwendigen Hauptarbeitsgebiete.....	18
5 Randbedingungen	22
6 Erläuterung der vier Hauptarbeitsgebiete	23
6.1 Statische Funktionsprüfung	23
6.1.1 Überwachung des Kalibrierprozesses	24
6.1.2 Grenzwertüberwachung	25
6.1.3 Vergleich der Werte untereinander.....	25
6.1.4 Messwertstabilität.....	27
6.1.5 Untersuchung der Standardabweichung	28
6.2 Beharrungserkennung	31
6.2.1 Grundsätzliches zum Messablauf.....	32
6.2.2 Möglichkeiten der Beharrungsbeurteilung	34
6.2.3 Theoretische Betrachtung und Bestimmung des Übertragungsverhaltens.....	37
6.3 Fehlerdetektion (FD Fault detection)	42
6.3.1 Kohlenstoffbilanz	45
6.3.1.1 Allgemein gültige Feuchtekorrektur	46
6.3.1.2 Modellbildung.....	50
6.3.2 Abgastemperaturmodell	55
6.3.3 Kontrolle des Turboladers	59
6.3.4 Übersicht über die umgesetzten Plausibilitätsprüfungen.....	73

6.3.4.1 Bilanzgleichungen.....	73
6.3.4.2 Abgasbetrachtungen.....	76
6.3.4.3 Turboladerplausibilitäten.....	77
6.3.4.4 Ungleichungen im Bereich Drücke / Temperaturen	79
6.3.4.5 Kontrolle der Indizierdaten	80
6.3.4.6 Referenzpunkterkennung bei 2000 Umdrehungen/min	81
6.3.4.7 Sonstige Überprüfungen	81
6.4 Fehlerisolation (FI Fault Isolation).....	83
6.4.1 Inferenzverfahren	84
6.4.2 Klassifikationsmethoden.....	87
6.4.3 Logisch-wahrscheinlichkeitsbasiertes Verfahren.....	90
6.4.3.1 Abschätzung der Fehleranzahl	90
6.4.3.2 Isolierung durch Schwellenwertbetrachtung	92
6.4.3.3 Isolation durch Wahrscheinlichkeitsbetrachtung	97
7 Umsetzung	99
7.1 Anbindung an den Prüfstand	99
7.2 Parametrierung	99
7.2.1 Notwendige, im Voraus zu bedatende Größen	100
7.2.2 Parametrierung der Prüfaufgabe	100
7.3 Ausgabe.....	102
8 Leistungsfähigkeit des Verfahrens	106
9 Zusammenfassung / Ausblick.....	108
10 Anhang	110
10.1 Feuchtekorrekturen nach EU-Norm und empirischer Formel.....	110
10.2 Technische Daten der Dieselmotoren des Abgastemperaturmodells	111
11 Literaturverzeichnis	112

Verwendete Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
Messgrößen:		
\dot{m}_{Luft}	kg/s	Motor-Luftmassenstrom
$\dot{m}_{\text{Brennstoff}}$	kg/s	Kraftstoffverbrauch
Md	Nm	Motordrehmoment
n	1/s	Motordrehzahl
p ₀	Pa	Druck Umgebung
p ₁	Pa	Druck nach Luftfilter
p ₂	Pa	Druck nach Verdichter
p ₃	Pa	Druck im Abgaskrümmer
p _{r0}	-	Druckverhältnis Verdichter bei m=0
T ₁	K	Temperatur im Luftfilter
T ₂	K	Temperatur nach Verdichter
Rechengrößen:		
C _i	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
K _g	m/s	Mittlere Kolbengeschwindigkeit
g _i	-	Gewichtsanteil
h _i	J/kg	Enthalpie
h _{ti}	J/kg	Totalenthalpie
KF	-	Feuchtekorrekturfaktor
kg	m/s	Mittlere Kolbengeschwindigkeit
L _{stoe}	kg Luft/kg Brennst.	Stöchiometrischer Luftbedarf
$\dot{m}_{\text{Abgas tr}}$	kg/s	Abgasmassenstrom nach Entfeuchtung (trocken)
\dot{m}_{Abgas}	kg/s	Abgasmassenstrom feucht
p _{me}	Pa	Effektiver Mitteldruck
p _{mr}	Pa	Reibmitteldruck
p _{ti}	Pa	Totaldruck (adiabat auf c=0 entspannt)
P _{Turbine}	W	Vom Abgas an die Abgasturbine abgegebene Leistung
φ	-	Polynomparameter Drehzahllinie
β	-	Polynomparameter Drehzahllinie
P _{Verdichter}	W	Vom Verdichter an die Ansaugluft abgegebene Leistung

p_{me}	Pa	Effektiver Mitteldruck
r_i	-	Raumanteil
RK	mg/m^3	Rußkonzentration
T_{ti}	K	Totaltemperatur an der Messstelle i
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
V_h	m^3	Hubraum
η_{verd}	-	Verdichterwirkungsgrad
η_{Turb}	-	Turbinenwirkungsgrad
η_E	-	Effektiver Motorwirkungsgrad
λ	-	Lambda ; = Luft-Kraftstoffverhältnis
Π	-	Druckverhältnis
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

Stoffwerte:

$c_{Brennstoff}$	Gewichtsanteil	Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes
c_p	J/kgK	Spez. Wärmekapazität des Abgases
$g_{O_2_Luft}$	-	Gewichtsanteil O ₂ in der Luft
$g_{CO_2_Luft}$	-	Gewichtsanteil CO ₂ in der Luft
$h_{Brennstoff}$	Gewichtsanteil	Wasserstoffgehalt des Brennstoffes
H_u	J/kg	Unterer Heizwert des verwendeten
M_i	g	Molmasse des Elements i
$O_{Brennstoff}$	Gewichtsanteil	Sauerstoffgehalt des Brennstoffes
R	287 J/kgK	Gaskonstante
VM	m^3	Molvolumen idealer Gase
γ	-	Adiabatexponent c_p/c_v
ρ	kg/m^3	Dichte

1 Einleitung

Moderne Verbrennungsmotoren aus dem PKW- oder NFZ-Bereich erfordern für die Erfüllung der Abgasgesetzgebung und die stetig steigenden Anforderungen bezüglich Leistung, Fahrbarkeit und Verbrauch einen immer höheren Applikationsaufwand.

Die Anzahl der Aktoren, die Einfluss auf die Verbrennung, die Leistung und das Abgasverhalten nehmen, steigt stetig an. Inzwischen müssen fast für jeden Motor folgende Stell- oder Regelgrößen optimiert werden:

- Drosselklappe
- Zündzeitpunkt oder Förderbeginn
- Vor- und Nacheinspritzungen
- Variable Turbolader oder Abgasventile
- Klappen zur Beeinflussung der Zylinderinnenströmung
- Ventilhub, Dauer und Winkellage
- AGR-Rate
- Sekundärluft
- Einspritzdruck

Der Messaufwand nimmt damit natürlich gleichermaßen zu, und zwar exponentiell, wenn alle Einstellwerte kombiniert miteinander variiert werden sollen. Dies führt zur Verbreitung von alternativen Messmethoden, die zwar eine umfangreiche Modellbildung erfordern, aber mit einer vergleichbar geringeren Anzahl von Messpunkten zur Optimierung auskommen (DoE: Design of Experiments). Der Zusatzaufwand kann dadurch etwas eingedämmt werden.

Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Richtigkeit der Messdaten bei reduzierter Messpunktanzahl immer wichtiger wird. Wird eine Kennlinie zwischen zwei Größen nur noch mit 3 statt wie bisher mit 5 Punkten gebildet, so wirkt sich ein falscher Messpunkt mitunter sehr drastisch in der Lage des gefundenen Optimums aus. Diese Optimierungsstrategien sind folglich gegenüber Messfehlern deutlich empfindlicher, was eine Datenplausibilität und Überprüfung notwendig macht.

Um die genauen Optima und Einstellungen am Motor bestimmen zu können, steigt neben der Anzahl der Aktoren und der Anzahl der Messpunkte natürlich auch die Anzahl der Messgrößen stetig an.

Und obwohl die Qualität der Messgeräte in den letzten Jahren zugenommen hat, ist der Ausfall eines Sensors oder die falsche Kalibrierung desselben noch immer Hauptursache für Fehlmessungen und damit verbundene Zusatzaufwände.

Nicht zu vernachlässigen sind auch die durch Fehlmessungen absinkende Motivation des Prüfstandspersonals und die Probleme bei der Einhaltung von Terminen.

Aus den genannten Gründen wird es immer dringlicher, die Messdaten schon während der Messung durch ein Programm zu kontrollieren. Dieses Kontrollprogramm sollte das Wissen und die Erfahrung eines qualifizierten Prüfstandsingenieurs beinhalten. Werden Fehler während oder sogar noch vor der Messung entdeckt, kann wertvolle Zeit bei der Instandsetzung und durch entfallende Wiederholungsmessungen eingespart werden.

2 Zielsetzung / Motivation

Die vorliegende Arbeit greift genau diesen Gedanken auf. Ein Prüfprogramm soll es ermöglichen, Fehlmessungen in nahezu Echtzeit aufzuspüren, und damit die Messdatenqualität und die Rentabilität von Motorenprüfständen zu steigern. Dies betrifft sämtliche Prüfstands Anwendungen, wie Applikation, Dauerlaufversuche oder sonstige Forschungsprüfstände, bei denen Verbrennungsmotoren mit einer größeren Anzahl von Sensoren bestückt sind.

Hintergründe sind eine bei allen Motorenprüfständen sehr hohe Ausfallrate eines der verwendeten Messgeräte sowie die immer umfangreichere Anzahl von Messgrößen.

Auch die Abfolge der Messpunkte bei modernen Vermessungsstrategien, bei denen mehrere Stellgrößen gleichzeitig verstellt werden, macht die Nachvollziehbarkeit der Messwertänderungen fast unmöglich. Die Einschätzung, wie sich beispielsweise die Stickoxidemission bei gleichzeitiger Erhöhung des Raildruckes, Erhöhung der AGR und Frühverstellung des Förderbeginns verhalten wird, ist auch für geübtes Personal kaum zu bewerkstelligen.

Meist zeigt sich erst längere Zeit nach der Messung, ob die Daten den Anforderungen gerecht wurden, durchaus auch mit dem Ergebnis, dass die Messung vollständig wiederholt werden muss. Da die Motoren auf modernen Palettensystemen nur noch für die Dauer von einem Tag am Prüfstand verweilen, ist die Wiederholung der Messung meist mit einem sehr großen Zeitverzug und organisatorischem Aufwand verbunden.

Die Prüfung, ob die Daten richtig oder falsch sind, ist unter diesen Bedingungen nur mit einem aufwändigen Formelwerk, gepaart mit einem umfangreichen Erfahrungsschatz eines Prüfsingenieurs, möglich. Genau diese Funktionalität soll mittels einer Software, zunächst auf einem separaten Prüfrechner, schon online während der Messung bereitgestellt werden.

Es sind daher Prüfroutinen nötig, die zum einen mit einem Minimum an Systemwissen funktionsbereit sind, und zum anderen so schnell rechnen, dass die Onlinefähigkeit garantiert ist. Zielsetzung ist es, lediglich mit den ohnehin im Prüfrechner vorhandenen Motorinformationen auszukommen. Dies sind z.B. Informationen über Bohrung, Hub, Zylinderzahl, Aufladeverfahren oder Motortyp. Es darf weder eine vorangegangene Vermessung des Motors vorausgesetzt werden, noch ein spürbarer zusätzlicher Messaufwand nötig sein. Ziel ist ein System, das in großer Zahl im Prüffeld eingesetzt werden kann.

Für den Prüfstandsfahrer bedeutet die Einführung eines solchen Systems, dass er online auf Unregelmäßigkeiten im Prüfablauf hingewiesen wird und auch Hilfestellungen bei der Ursachenfindung erhält. So soll das Programm angeben, wo die potentiellen Fehlerquellen für die gefundenen Unstimmigkeiten zu suchen sind. Aufgrund der Vielzahl von Ursachen kann der letzte Punkt natürlich nur als Hilfestellung angesehen werden. Eine Einschränkung auf die wahrscheinlichsten Ursachen hilft dennoch bei der Fehlerfindung durch den Prüfstandsfahrer.

Die folgende Aufstellung soll die Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten nochmals verdeutlichen. Aufgetragen sind die anhand mehrerer Prüfstandseinrichtungen festgestellten Fehlerquellen und deren Häufigkeit, wobei diese je nach Anwendungsfall und Messaufgabe sehr stark schwanken kann. Die Grafik gibt dennoch einen sehr guten Überblick über die Hauptproblemfelder.

Im Schnitt kann spätestens alle 2 Tage mit einer Messverzögerung oder einer Fehlmessung gerechnet werden. Aus der Aufsummierung dieser Fehlzeiten ergibt sich direkt das Einsparpotential, das diese Arbeit rechtfertigt.

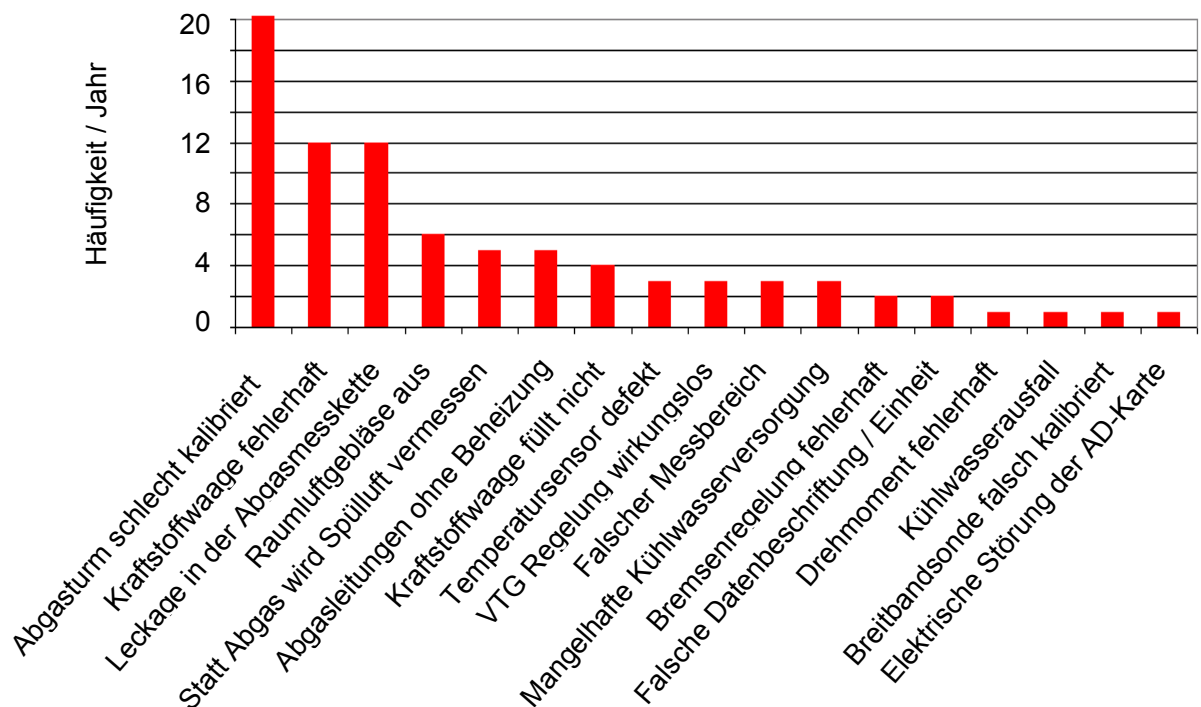


Abbildung 2.1: Aufstellung der häufigsten Fehler

Die Fehler umfassen hauptsächlich die Abgas- und Kraftstoffverbrauchsmessung. Neben der Fehlkalibrierung einer der Abgaskanäle sind vor allem Leckage und ausgefallene Heizelemente die Probleme bei der Abgasmessung. Bei der Verbrauchsmessung ist meist die Signalqualität der Kraftstoffwaage nicht zufrieden stellend. Ein ausgefallener Füllvorgang kann im schlimmsten Falle das Trockenlaufen der Einspritzpumpen zur Folge haben, was stets einige Stunden Messzeitausfall zur Folge hat.

Oft sind es aber auch Kleinigkeiten, die über die Brauchbarkeit von Messdaten entscheiden. Werden einfache, elektrische Schalter aufgrund von Unachtsamkeit vergessen, so läuft der Test beispielsweise ohne Raumluftkonditionierung, oder der Abgasmessturm erhält kein Abgas zur Analyse, sondern weiterhin Spülluft. Auch falsche Messbereiche und somit völlig falsche Zahlenwerte können Folge solcher, doch eher als Kleinigkeiten zu bewertenden Dinge sein.

Weniger vom Personal abhängig sind Ausfälle oder Defekte in der Druck- und Temperaturmessung im Abgasstrang. Gerade diese Sensoren unterliegen erhöhten Belastungen durch die stark pulsierende mechanische Belastung und die heißen, chemisch aggressiven Medien. Hier sind zwei Fehlerarten typisch. Zum einen die schleichende Fehlkalibrierung der Drücke, die nur schwer zu detektieren ist (zumindest bei laufendem Motor), und zum anderen der nach kleinen Ungenauigkeiten recht schnell ausfallende Temperatursensor mit sehr eindeutigen Fehlergrößen.

Verschmutzte Filter in der Kühlwasserversorgung des Prüfstandes können zu überhöhten Wassertemperaturen im Motor, oder auch zu Regelproblemen an wasserabhängigen Belastungseinheiten führen. Neben defekten oder falsch kalibrierten Kraftmessdosen sind an den Belastungseinheiten kaum Probleme vorhanden.

Wenn die jährlich empfohlene Kalibrierung der Breitbandsonden nicht erfolgt, oder die Sonde frühzeitiger verstimmt ist als geplant, kommt es auch in diesem Zusammenhang zu Unstimmigkeiten zwischen den Messgrößen.

3 Stand der Technik

Analysiert man die aktuell am Markt befindlichen Prüfstandssysteme, so ist festzustellen, dass es eine automatische, umfassende Plausibilitätsbetrachtung zeitgleich zur Messung bislang nicht gibt. Einige Sondermessgeräte verfügen zwar über Diagnosesysteme, jedoch beschränken sich diese auf die geräteinterne Betriebsbereitschaft. Ein Nachweis über die Richtigkeit des Messwertes ist damit noch nicht gegeben. Ansonsten ist es die Aufgabe des Prüfstandsfahrers, die Messtechnik und den Motor zu überwachen. Eine Zielsetzung, die in der heutigen Zeit aus den schon genannten Gründen nicht mehr realistisch umgesetzt werden kann.

Es sollen aber verschiedene mit dieser Thematik verwandte Diagnoseansätze aufgezeigt, und deren Möglichkeiten für die Onlinediagnose geprüft werden.

3.1 Offline-Diagnose von Messdaten

Die Grundbedingung eines Motorsteuergerätes setzt eine umfangreiche Modellbildung des Motors anhand der vorliegenden Messdaten voraus. Im Zusammenhang mit dieser Modellbildung ist es möglich, einzelne Auffälligkeiten oder Messfehler zu detektieren. Die genaue Analyse dieser Auffälligkeiten obliegt dann dem verantwortlichen Ingenieur, der die Daten bearbeitet.

Die Methoden hierzu sind meist weniger physikalischer Natur, sondern basieren auf statistischen und qualitativ bewertenden Verfahren. Die Vorgehensweise kann als standardisiert bezeichnet werden, soweit es um die Auswertung von DoE-

Datensätzen einer Stationärpunktvermessung geht. Diese ist nach wie vor die Basis für die Applikation von Motorsteuergeräten. Die Methodik der Datendiagnose ist daher in verschiedenen Schriftstücken zur statistischen Versuchsplanung beschrieben [6, 22, 36]. An dieser Stelle sollen einige Methoden vorgestellt werden, um den Unterschied zur Onlinediagnose deutlich zu machen.

3.1.1 XT-Plots, Scatterplots

Wird ein einzelner Messkanal über der Zeit aufgetragen (XT-Plot), so können Ausreißer oder Messgeräteausfälle sehr einfach erkannt werden. Die folgende Grafik zeigt die Messwerte eines Sauerstoffanalysators, der zu Beginn der Messung an die Messbereichsgrenze gelangt ist. Die Messwerte der ersten 15 Sekunden liegen bei exakt 15%. Ein Wert, der motorisch in dieser Ausprägung nicht zu erreichen ist. In der zweiten Hälfte der Messung ist ein Ausreißer sichtbar, der auf Messgeräteausfall oder elektrische Probleme zurückgeführt werden kann. Da der Wert von einem Prozent Sauerstoff im Abgas theoretisch auch mit Dieselmotoren erreicht werden kann, muss zur Analyse dieses Punktes auch noch weiteres Datenmaterial (CO₂-Gehalt, Lambda, Abgastemperatur) herangezogen werden, um die nötige Eindeutigkeit zu erhalten.

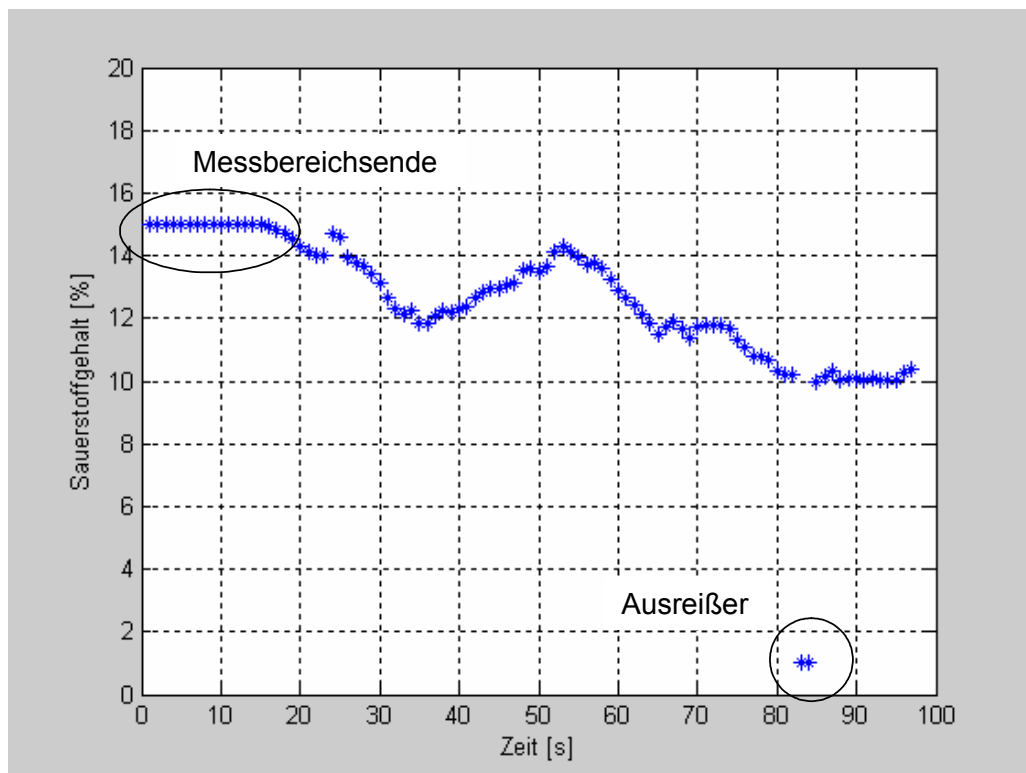


Abbildung 3.1: Diagnose mittels XT-Plots

Eine weitere Aussage aus dieser Auftragungsart lässt sich gewinnen, wenn im Verlauf des Messtages Referenzpunkte eingebracht werden. Werden diese Referenzpunkte selektiert und wiederum über der Zeit aufgetragen, so erhält man einen sehr schnellen und genauen Eindruck über die Stabilität der Messgrößen.

Sensorausfälle, Fehlkalibrierung und verändertes Motorverhalten treten hierbei eindeutig zutage.

Weitere Besonderheiten können dadurch erkannt werden, dass bekannte, charakteristische Zusammenhänge zwischen zwei Messgrößen grafisch dargestellt werden. Als Beispiel sei der Zusammenhang zwischen dem CO_2 -Gehalt im Abgas und dem Lambdasondenwert genannt. Auch wenn der genaue physikalische Zusammenhang zwischen CO_2 und Lambda nicht jedem bekannt ist, so kann doch sofort aufgrund des qualitativen Verlaufs die Richtigkeit der Messdaten geprüft werden.

Im folgenden Beispiel (Abbildung 3.2) wird der Unterschied zu den XT-Plots deutlich. Die hier eindeutig hervortretenden Ausreißer wären in der vorher gezeigten Darstellung nicht sichtbar, da die Messwerte vollständig im realistischen Wertebereich liegen. Erst im logischen Zusammenhang fällt der Fehler auf.

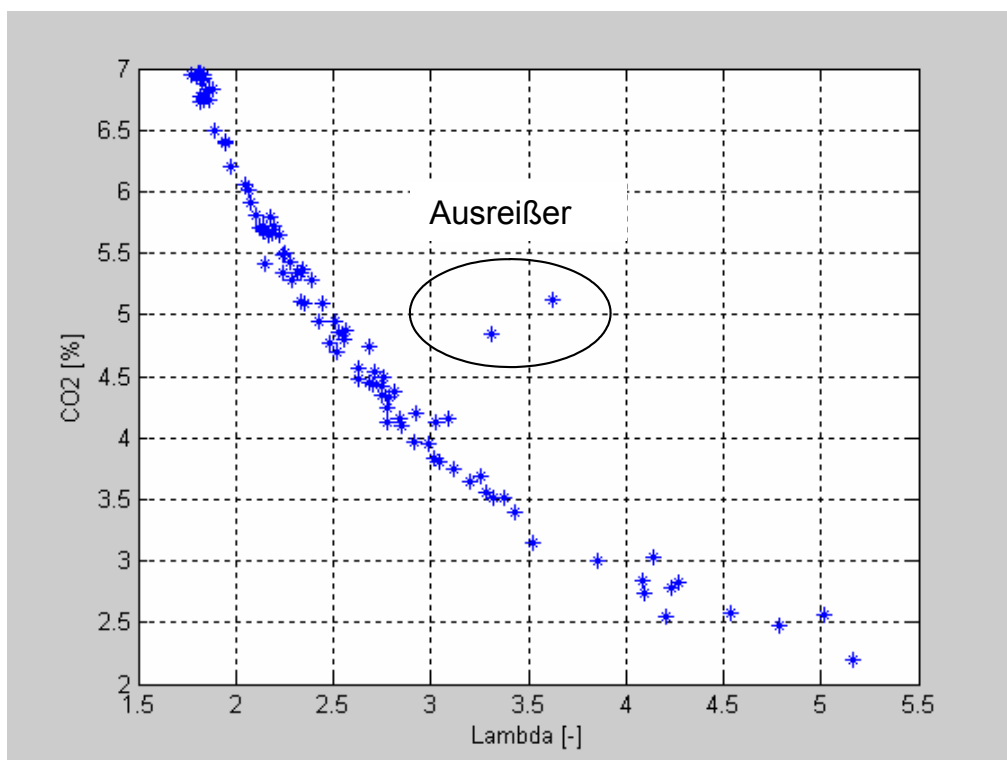


Abbildung 3.2: Diagnose mittels Scatterplots

Für solch qualitative Zusammenhänge lassen sich noch viele weitere Paarungen finden, die eine gute Fehlerdetektion ermöglichen. So z.B. sämtliche Abgaskomponenten über Lambda, die Motorleistung über Luftmasse und Kraftstoffverbrauch oder Drücke und Temperaturen über der spezifischen Leistung.

Sind in den so geprüften Daten keine Messwertauffälligkeiten mehr zu finden, so kann eine erste Modellbildung erfolgen. Damit ergeben sich wieder neue Möglichkeiten mit weiter gesteigerter Diagnosetiefe.

3.1.2 Residuenbetrachtung

Ist ein Modell, z.B. als Polynommodell oder als neuronales Netz, anhand der Messdaten erstellt worden, so können aufgrund des Vergleichs zwischen Messdaten und den Modelldaten weitere Auffälligkeiten detektiert werden. Dies kann sehr einfach erfolgen, indem die Messdaten den Modelldaten grafisch gegenübergestellt werden. Erwartet wird eine Ansammlung der Punkte auf einer 45°-Linie (Abbildung 3.3). Sind die Residuen (Differenzen zwischen Mess- und Modelldaten) in Einzelpunkten zu groß, so kann dies an einem fehlerhaften Modell oder an falschen Messdaten liegen. Auch hier obliegt dem Versuchingenieur die genauere Analyse dieser Punkte. Aufgrund der in diesem Stadium schon deutlich kleineren Ungenauigkeiten ist ein großer Erfahrungsschatz oder die Korrekturrechnung mittels physikalischer Ansätze notwendig, um zwischen Modell- und Datenfehlern unterscheiden zu können.

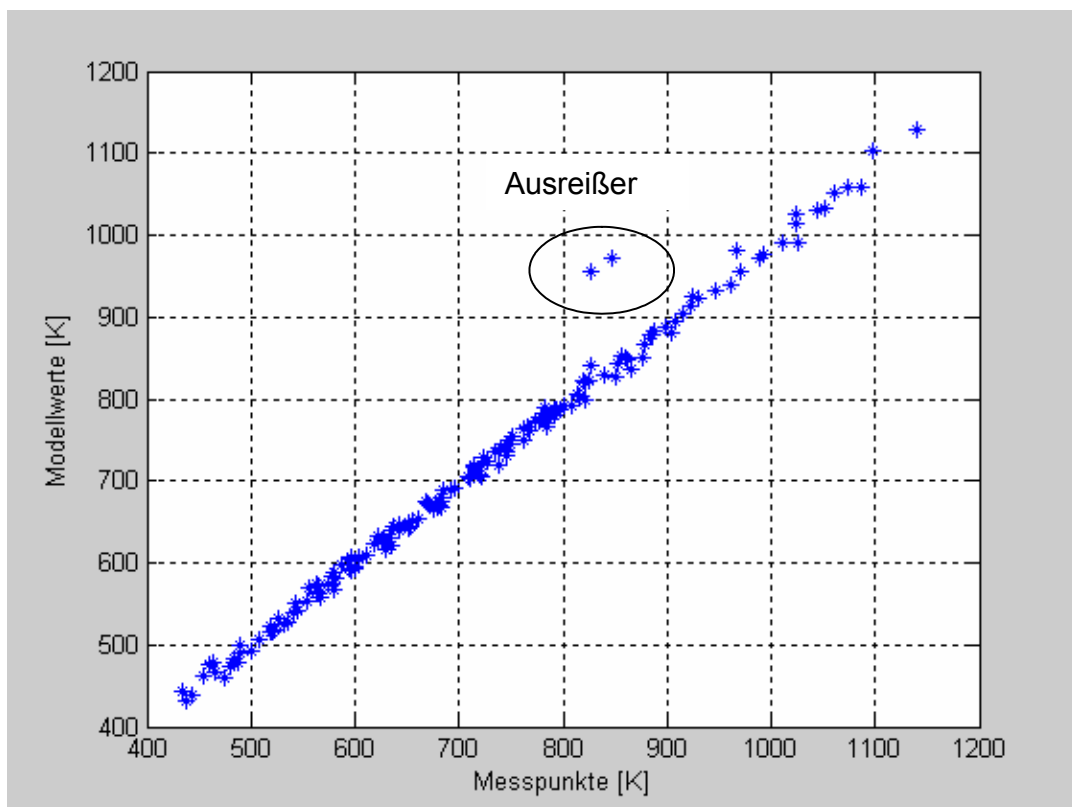


Abbildung 3.3: Qualitative Prüfung von Modelldaten

In dem hier gezeigten Abgastemperaturmodell eines PKW-Dieselmotors kann eine fehlerhafte Modellbildung ausgeschlossen werden, da lediglich 2 Punkte sehr weit vom Erwartungswert abweichen, und dies bei einer sehr kleinen Standardabweichung der Messdaten vom Modell. Die Fehleranalyse gestaltet sich etwas schwieriger als bei den XT- oder Scatterplots, da je nach Komplexitätsgrad sehr viele Eingangsgrößen vorliegen, von denen wiederum jede als Fehlerursache in Frage kommt.

Die aus der Modellanalyse gewonnenen Residuen können auch noch unter anderen Gesichtspunkten ausgewertet werden.

- Sind die Messpunkte zufällig, und nicht strukturiert aneinandergehängt gefahren worden, so ist auch für die zeitliche Abfolge der Residuen eine zufällige Anordnung zu erwarten.
- Somit darf sich keine zeitliche Abhängigkeit der Residuen zeigen.
- Starke Abweichungen der Residuen von einer Normalverteilung sind ebenfalls ein Indiz für fehlerhafte Modellbildung, oder fehlerhafte Messdaten

Vorteil dieser Betrachtung ist die rein auf qualitative Zusammenhänge beschränkte Vorgehensweise. Spezifische Motoreigenschaften, der Motortyp oder umfangreiches physikalisches Wissen sind daher für das Aufspüren der Fehler nicht erforderlich. Auch ist die Genauigkeit dieser Diagnose sehr gut, was die Detektion von Einzelfehlern angeht. Diese Vorgehensweise ist daher als notwendig und auch zielführend für eine hochwertige Modellbildung anzusehen.

Allerdings sind in diesem Zusammenhang einige Nachteile zu nennen, die zusätzliche Entwicklungen, und damit die vorliegende Arbeit erforderlich machen.

Die bislang vorgestellten Methoden erfordern einen großen Umfang von bereits vermessenen Daten. Eine Diagnose ab dem ersten Messpunkt ist hierdurch nicht möglich. Aus denselben Gründen ist es außerdem nicht möglich, einen über die gesamte Messung vorliegenden Kalibrierfehler zu entdecken. Ein solcher Fehler würde mit in die Modellbildung aufgenommen und wäre damit nicht mehr sichtbar.

Außerdem ist es aus Sicht der Kosten und Rentabilität wenig sinnvoll, die Daten erst am Bürorechner zu testen, nachdem unter Umständen schon mehrere Messtage verstrichen sind.

3.2 On Board Diagnose

Eine Onlinediagnose am Prüfstand läuft meist unbeachtet aber in großem Umfang innerhalb der elektronischen Steuergeräte ab, sofern es sich nicht um einen neuen Motor mit nur unvollständig appliziertem Steuergerät handelt.

Seit Einführung der OBD (On Board Diagnose) im Jahre 1988 durch die "California Air Resource Board" (CARB) hat sich diese motorinterne Diagnose aller abgasrelevanten Bauteile inzwischen zum internationalen Standard im Bereich Europa, Japan und Nordamerika entwickelt. Inzwischen liegt mit der OBD2 oder der europäischen EOBD eine sehr detaillierte Diagnose des Motors vor in den Bereichen:

- Aussetzererkennung
- Katalysatorzustand bei Kaltstart und betriebswarmem Motor
- Kraftstoff- und Tanksystem
- Gemischregeleinrichtungen (Drosselklappen, Lambdasonden)
- Kühlmittelthermostat

- Funktionsüberprüfung der elektrischen Leitungen und Sensoren
- Funktionsprüfung der Aktorik
- Funktionsprüfung Datenbus CAN

Daher ist es zunächst nahe liegend, zyklisch den Fehlerspeicher des Motors auszulesen, ob dort ein Fehler erkannt wurde oder nicht. Damit wäre ein erstes Mittel zur Plausibilisierung von Messdaten online am Prüfstand gefunden. Aufgrund von Schnittstellenproblemen und der mangelnden Verfügbarkeit der benötigten „offenen“ Steuergeräte findet diese Überprüfung allerdings nur beschränkt statt. Außerdem handelt es sich in den Forschungseinrichtungen der Automobilindustrie vielfach um neue Motoren, bei denen die Prüfroutinen für die OBD noch nicht vollständig bedatet sind.

Trotzdem sind innerhalb der Steuergeräte interessante Diagnoseansätze zu finden, von denen an dieser Stelle einige vorgestellt werden sollen.

3.2.1 Luftmassensensor

Die Luftmassenmessung ist aufgrund der Oszillationen der Gassäule im Ansaugbereich eine Anfällige und sensible Messung. Da die Luftmasse aber die Schlüsselgröße zur Bestimmung der eingespritzten Kraftstoffmasse ist, wurde dieser Sensor schon frühzeitig einer Überwachung unterzogen.

Die Funktionalität basiert auf einem Kennfeld, das mit der Struktur der frühen $n-\alpha$ -Motorsteuerungen vergleichbar ist. Den Eingangsgrößen Drosselklappenwinkel und Motordrehzahl wird aus diesem Kennfeld ein passender Luftmassenstrom zugewiesen. Korrigiert man diese Größe mit der Saugrohrtemperatur, so liegt bereits eine recht genaue rechnerische Luftmasse vor. Komplexer gestaltet sich das bei Hinzunahme von variablen Steuerzeiten und AGR-Betrieb. Hierbei müssen entweder Korrekturglieder eingeführt werden, oder aber die Diagnose beschränkt sich auf feste Werte für Steuerzeiten und AGR-Ventilposition. Der Vergleich zwischen Mess- und Rechenwert wird nach Umrechnung in eine Einspritzdauer des Kraftstoffs durchgeführt [1]

Das Modell ist stark empirischer Natur, d.h. der Motor muss im Vorfeld detailliert vermessen worden sein, um z.B. die Kennlinie und Charakteristik der Drosselklappe richtig wiederzugeben. Dies schränkt die für den Prüfstandsbetrieb notwendige Allgemeingültigkeit des Verfahrens ein. Vermessungen verschiedener Drosselklappen haben ergeben, dass schon der Einfluss des Schließwinkels ($5-7^\circ$) und der Einfluss des Leerlaufuftstellers einen so großen Einfluss auf die Durchflussskennlinie haben, dass die Methodik ohne größeren Parametrieraufwand und unabhängig von variablen Steuerzeiten oder AGR nicht Erfolg versprechend am Prüfstand durchgeführt werden kann.

3.2.2 Lambdasonde

Um den Katalysator von Ottomotoren in seiner Funktion optimal ausnutzen zu können, muss sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch sehr genau im stöchiometrischen Verhältnis befinden. Dafür sorgt die Lambda-Regelung über die Signale der Lambdasonden. Dadurch, dass zwei Lambdasonden pro Abgasstrang vorhanden

sind, kann über die Sonde nach dem Katalysator die Sonde vor Katalysator auf Verschiebung der Regellage und des Absolutwertes hin überprüft werden. Es liegt somit eine Bauteilredundanz vor, die grundlegendste Form der Diagnose.

Aber auch die Einzelsonden lassen sich mit den Mitteln der OBD bei vertretbarem Aufwand überwachen. Eine einzelne Lambdasonde, die über längerer Zeit höheren Temperaturen ausgesetzt ist, reagiert unter Umständen langsamer auf Änderungen des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Dadurch vergrößert sich die Periodendauer des 2-Punkt-Reglers der Lambdaregelung. Eine Diagnosefunktion überwacht diese Regelfrequenz und vergleicht sie mit hinterlegten Grenzwerten. Dies ermöglicht auch bei einer einzelnen Sonde Rückschlüsse auf deren Funktionalität.

Gleichzeitig wird die Lambdasonde auf ihre inneren Werte hin überprüft. Hierzu wird der Innenwiderstand durch Messung von Heizstrom und Spannung berechnet [1]. Mechanische Beschädigungen, Versinterung oder Ablagerungen können hierdurch erfasst werden.

Der Vergleich zweier Lambdasonden, sowohl in der Regelcharakteristik als auch im Absolutwert, bietet eine allgemeingültige Diagnosestrategie, die auch am Prüfstand Verwendung finden kann. Die Analyse der Regelcharakteristik erfordert lediglich eine ausreichende Abtastrate, die aber bei 10 Hz schon gegeben ist. Strom- und Spannungsmessung zur Kontrolle des Innenwiderstandes machen hingegen einen zusätzlichen Messaufwand notwendig, weswegen diese Funktionalität nicht für die Prüfstandsdiagnose geeignet ist.

3.2.3 Abgasrückführung (AGR)

Zur Erfüllung der Abgasgesetzgebung bietet sich sowohl für Otto- als auch für Dieselmotoren die so genannte Abgasrückführung an, d.h. es wird Abgas im Krümmerbereich entnommen und wieder in den Ansaugbereich eingespeist. Hierdurch erhöht sich der Innertgasgehalt im Brennraum, wodurch die Stickoxidbildung reduziert wird.

Da das notwendige AGR-Ventil einen relevanten Einfluss auf die Abgasemission ausübt, ist eine entsprechende Überwachung vorgeschrieben. Durchgesetzt haben sich zwei Varianten, die beide auf physikalischen Überlegungen beruhen.

Die erste Variante sieht eine Temperaturmessung nach der Mischstelle von Abgas und Frischluft vor. Die Temperaturerhöhung bei Aktivierung der AGR ist dabei ein Maß für den AGR-Massenstrom. Die Mischungstemperatur kann auf den Grundlagen des 1.HS berechnet werden, da ja Ansaugtemperatur, Luftmassenstrom und auch die Abgastemperatur (T_3 im Fahrzeug nur als Modell) vorliegen. [2]

$$\dot{m}_{\text{Mischung}} \cdot c p_{\text{Mischung}} \cdot T_{\text{Mischung}} = \dot{m}_{\text{AGR}} \cdot c p_{\text{AGR}} \cdot T_{\text{AGR}} + \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c p_{\text{Luft}} \cdot T_{\text{Luft}} \quad [1]$$

Die zweite Variante kann nur beim Übergang in den Schubbetrieb getestet werden. Die Drosselklappe wird hierbei vollständig geschlossen. Anschließend wird das AGR-Ventil geöffnet. Der Druck hinter Drosselklappe muss dabei sprunghaft ansteigen, da das Saugrohr entsprechend der Druckdifferenz zwischen Krümmer und Ansaugbereich mit Abgas aufgefüllt wird. Über eine Kennlinie kann die AGR-Menge bestimmt werden.

Die erste Variante hat einen allgemeingültigeren Charakter, da als formeller Zusammenhang der erste Hauptsatz zur Verfügung steht und mit Messdaten gelöst werden kann. Eine spezielle Vermessung des AGR-Ventils ist dabei nicht erforderlich. Problematisch gestaltet sich lediglich die Vergleichsgröße, die zu Diagnosezwecken vorhanden sein muss. Der AGR-Massenstrom wird in Steuergeräten in verschiedensten Einheiten dargeboten. Von Prozenten eines Modellwertes, der Taktrate des Ventils über tatsächliche Kilogramm Abgas pro Stunde bis hin zur Prozentualen AGR-Rate sind sämtliche Werte gebräuchlich. Daher benötigt eine Diagnose der AGR am Prüfstand immer eine spezielle Abstimmung auf die entsprechende Motorelektronik.

3.2.4 Zündaussetzererkennung

Zündaussetzer resultieren in erhöhten Abgaswerten der limitierten Schadstoffkomponenten HC und CO. Des Weiteren lassen sie sich detektieren im Abgasdruckverlauf, der Abgastemperatur, in der Zylinderdruckindizierung und in der Laufruhe (Drehungleichförmigkeit) des Motors.

Genau diese Drehungleichförmigkeit wird in den Steuergeräten genutzt. Der Zahnkranz auf der Kurbelwelle führt zu einem hochaufgelösten Drehzahlsignal. Jede Zündung führt zu einer Beschleunigung, jeder Verdichtungs Vorgang zu einer Verzögerung der Kurbelwelldrehzahl. Der zeitliche Abstand zwischen den Beschleunigungsphasen muss mit der Frequenz der Einspritzungen korrespondieren. Die Korrelation lässt bei einem Zündaussetzer stark nach, wobei durch die bekannte Reihenfolge der Einspritzsignale sogar der betroffene Zylinder detektiert werden kann. [2]

Wenn auch die Zuordnung der Einspritzungen zu den Einzelzylindern am Prüfstand nicht standardisiert erfolgen kann (Echtzeitfähige Anbindung der ECU erforderlich), so bietet sich doch die Analyse des Drehzahlsignals für Zündaussetzer an. Außerdem können auch weitere Signale wie Ansaug- und Abgasdrucksensoren bei entsprechender Abtastrate mit diesem Wert korreliert und geprüft werden. Erforderlich sind hierzu Abtastraten von 100 Hz – 1 kHz, je nach Zylinder- und Drehzahl.

3.2.5 Bewertung der OBD-Strategien als Basis für die Prüfstandsdiagnose

Die Diagnose innerhalb der ECU ist von Ihrer Struktur und Ausprägung eine viel versprechende Basis, die auch Ansätze für die Prüfstandsdiagnose bereithält. Viele Modelle basieren auf physikalischen Grundsätzen, wobei die Komplexität durch den Einsatz von Kennlinien und Kennfeldern begrenzt wird. Durch die Verwendung dieser empirischen, auf Messdaten basierenden Zusammenhänge ist außerdem eine gute Genauigkeit der Modelle möglich.

Da die Methoden nicht im gesamten Betriebskennfeld gültig sind, werden sie nur bei Bedarf und im passenden Moment aktiviert.

Sämtliche Fehler, die mittels der OBD-Logik detektiert werden können, liegen in Form von Fehler-Symptom-Bäumen vor. Über logische Beziehungen wird auf die tatsächliche Fehlerursache zurück geschlossen, die dann als Fehlermeldung abgespeichert und angezeigt wird.

Neben der offensichtlich auch für die Prüfstands-anwendung sehr gut geeigneten Struktur der Diagnose liegen die Probleme der Umsetzung hauptsächlich in der fehlenden Allgemeingültigkeit der Einzelmodelle. Gerade der Einsatz motorspezifischer Kennlinien ist am Prüfstand nicht umsetzbar. Hier kann nur versucht werden, über zusätzliche Messgrößen die entsprechende Information zu ersetzen. Des Weiteren ist die Ausrichtung der Methoden innerhalb der ECU eher auf die Diagnose von Bauteilen ausgerichtet. Genau diese sind aber nicht das Hauptproblem am Prüfstand (siehe Abbildung 2.1). Eine andere Problematik, die zum jetzigen Zeitpunkt eine Umsetzung der Methoden erschwert, ist die hohe Abtastrate, die innerhalb der Motorsteuerung vorliegt. Diese ermöglicht einen sehr tiefen Einblick in Einzelsignale, der bei niedrigeren Erfassungsraten mit der damit einhergehenden Filterung nicht mehr möglich ist.

3.3 Parameterschätzverfahren

Das Problem der aufwändigen, messdatenbasierten Modellbildung wird in verschiedenen Arbeiten durch eine alternative Vorgehensweise gelöst. So wird in manchen Anwendungen der Qualitätssicherung oder Prozessüberwachung nur noch die Charakteristik des Prozesses in Form von Übertragungselementen oder Differenzialgleichungen vorgegeben. Dies erfordert zunächst eine theoretisch basierte Modellbildung des realen Prozesses. Analysiert wird im Folgenden nur noch die Veränderung der Prozesskoeffizienten, die charakteristisch für das vorliegende Bauteil sind.

Als Beispiel soll an dieser Stelle die Überwachung eines Feder-Masse-Dämpfers betrachtet werden, bei dem die Koordinaten U und Y gegeben sind.

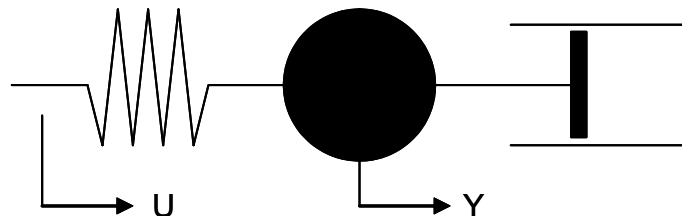


Abbildung 3.4: Beispiel zur Parameterschätzung

Das Kräftegleichgewicht an der Masse m ergibt:

$$\sum_i F_i = m\ddot{Y}(t) = c \cdot (U(t) - Y(t)) - d \cdot \dot{Y}(t) \quad [2]$$

oder

$$\ddot{Y}(t) + \frac{d}{m}\dot{Y}(t) + \frac{c}{m}Y(t) = \frac{c}{m}U(t) \quad [3]$$

Die überwachten Prozesskoeffizienten c , m und d können nun ermittelt werden, indem das zeitliche Verhalten von Y in Abhängigkeit von U analysiert wird. Dies kann

z.B. durch den Ansatz der minimalen quadratischen Abweichung zwischen Messdaten und Modelldaten erfolgen. Ändert sich das Dämpfungsverhalten, oder liegt ein Federbruch vor, so ist dies eindeutig detektierbar, ohne dass spezielle Sensoren hierfür erforderlich wären. Es werden lediglich die ohnehin vorliegenden Signale U und Y verwendet.

Es ist also auf Basis des Prozesswissens und der nachfolgenden Modellbildung eine sehr tiefgreifende Fehleranalyse möglich.

Die so genannten Parameterschätzverfahren können vorzugsweise für einfachere mechanisch-elektronische Systemen angewandt werden. Näheres hierzu in [10, 11, 19, 20]

3.3.1 Paritätsgleichungen

Die Modellbildung des Verbrennungsmotors stellt deutlich höhere Anforderungen, als dies für rein mechanisch-elektrische Produkte der Fall ist. Aufgrund komplexer Thermo- und Fluidodynamik, chemischer Reaktionen, Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung und einer starken Kopplung verschiedener Teilprozesse untereinander sind die Parameterschätzverfahren nur sehr eingeschränkt anwendbar. Für die Modellgestützte Fehlererkennung des nichtlinearen Verbrennungsmotors bieten sich daher besonders Verfahren mit Paritätsgleichungen an. Die Paritätsgleichungen nutzen die analytische Redundanz der verfügbaren Mess- und Stellsignale, in dem sie deren Abhängigkeiten untereinander in Form mathematischer Gleichungen beschreiben [29]. Für den fehlerfreien Fall sind diese Gleichungen abgesehen von Messunsicherheiten und Serienstreuung erfüllt.

Treten Fehler am realen Prozess auf, so ergeben sich Widersprüche zwischen den Modell- und Messausgängen. Im einfachsten Fall stellt sich ein solches System wie folgt dar:

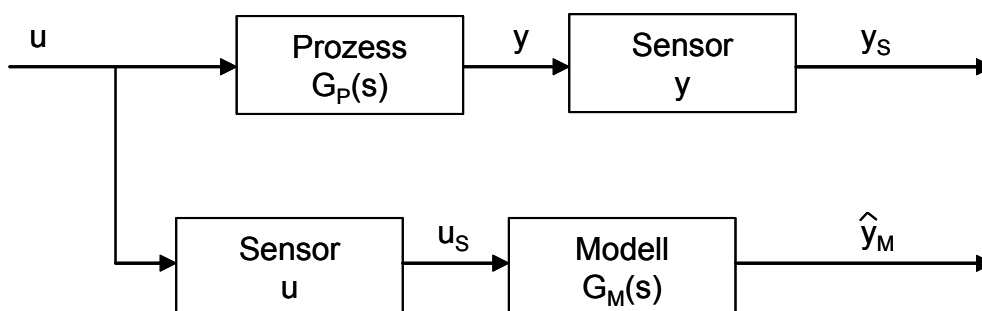


Abbildung 3.5: Prinzipskizze zum Aufstellen von Paritätsgleichungen [29]

Die Eingangsgröße u und die Ausgangsgröße y werden gemessen. Anhand des Prozessmodells $G_M(s)$ wird ein redundanter Ausgang \hat{y}_M abgeschätzt. Die Differenz zwischen Istausgang y_s und dem Schätzwert kann als Residuum bezeichnet werden.

$$Res = y_s(s) - G_M(s) \cdot u_s(s) \quad [4]$$

Für dieses System sind bereits mehrere Residuengleichungen formulierbar, die im Einzelfall besser oder schlechter zur Problemanalyse herangezogen werden können. In [29] konnte gezeigt werden, dass mittels Modellbildung und den resultierenden Paritätsgleichungen eine detaillierte Fehleranalyse des Ansaugtraktes eines aufgeladenen Dieselmotors möglich ist. Die Vorgehensweise soll nun erörtert werden, um daraus Schlussfolgerungen für die Anwendbarkeit am Prüfstand zu erhalten.

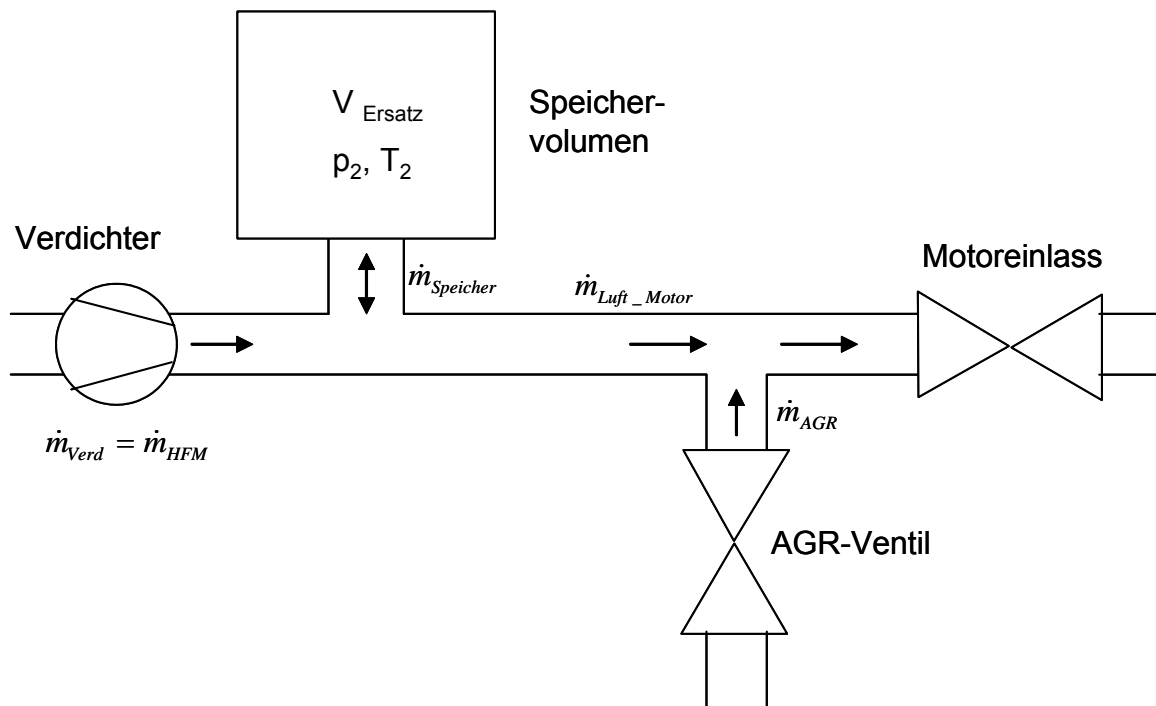


Abbildung 3.6: Ersatzmodell des Ansaugsystems eines Verbrennungsmotors

Das Ansaugsystem wird zunächst in ein Ersatzmodell überführt (Abbildung 3.5), für das sich nun mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Genauigkeit Beschreibungsgleichungen formulieren lassen.

Die erste Gleichung beschreibt die kapazitive Eigenschaft des Ersatzvolumens V .

$$\frac{dm_{Sp}}{dt} \cong \frac{dp_2}{dt} \cdot \frac{V_{Ers}}{RT_2} \quad [5]$$

Zusätzlich kann ein Mittelwertmodell zum Luftmassenstrom des Motors formuliert werden. In dieses ist ein kennfeldabhängiger Liefergrad einzuarbeiten, um den Füllungsverlusten durch Strömungswiderstand und Aufheizung gerecht zu werden.

$$\dot{m}_{Luft_Motor} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_a(n_{Motor}, \rho_2) \cdot n_{Motor} \cdot z \cdot V_h \cdot \frac{p_2}{RT_2} \quad [6]$$

Die gasdynamischen Effekte, also die Pulsationen aufgrund der Steuerzeiten des Motors, werden mit Signalmodellansätzen beschrieben. Der Mittelwert von Druck- und Luftmassenstrom wird mit einer Amplitude und Phasenverschiebung gegenüber dem Kurbelwellenwinkel α versehen.

$$p_2(\alpha) \cong \bar{p}_2 + A_{p2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{\alpha}{180^\circ KW} - \varphi_{p2}\right) \quad [7]$$

$$\dot{m}_{HFM}(\alpha) \cong \bar{\dot{m}}_{HFM} + A_{\dot{m}HFM} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{\alpha}{180^\circ KW} - \varphi_{\dot{m}HFM}\right) \quad [8]$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen ist es möglich, den Ansaugbereich eines Motors zu beschreiben. Mit einem Satz von Residuengleichungen, wohl definierten Vertrauensbereichen einer jeden Gleichung und einer Fehler-Symptom-Tabelle kann eine präzise Diagnose von Mess- und Bauteilfehlern erreicht werden. Der Wert dieser Vorgehensweise ist also für z.B. OBD-Anwendungen unzweifelhaft vorhanden.

Allerdings sind hierzu noch einige wesentliche Arbeiten notwendig. Der Liefergrad des Motors, die AGR-Ventilkennlinie sowie Amplitude und Phasenlage der Pulsationen müssen in aufwändigen Tests vermessen werden. Die Ergebnisse werden in Kennfeldern abgelegt, die dann fester Bestandteil der Gleichungen sind. Ohne diese vorherige Vermessung des Systems sind die Gleichungen nicht präzise genug, um eine Diagnose durchführen zu können.

Aus dem Grund können Paritätsgleichungen mit diesem Detaillierungsgrad nicht für eine Prüfstandsdiagnose herangezogen werden. Dieser einmalige hohe Aufwand lohnt sich nur bei Motoren, die eine lange Einsatzdauer mit aktiver Diagnose haben. Dies ist am Prüfstand aber nicht gegeben.

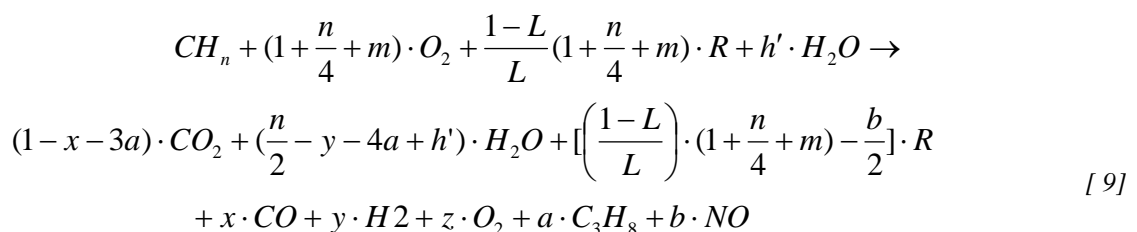
Die Parameterschätzverfahren haben neben der Eignung bei einfacheren Systemen den Nachteil, dass am Prüfstand selbst die Prozessstruktur nicht immer vollständig bekannt ist. So hat der Prüfstandsfahrer keine Kenntnis davon, an welcher Stelle sich eventuell Bypasskanäle oder zusätzliche Drosselstellen befinden. Auch ist nicht immer bekannt, ob und wie stark gerade in AGR-Ventilposition und Steuerzeiten eingegriffen wird. Dies wären aber notwendige Randinformationen, um das richtige Prozessmodell auswählen zu können.

Die fehlende Allgemeingültigkeit führt auch in diesem Bereich dazu, dass neue Ansätze zur Diagnose an Motorprüfständen gefunden werden müssen.

3.4 Bisherige Ansätze an Motorprüfständen

Die Diagnoseansätze finden sich z.B. bei den vollautomatisierten Prüfständen. Hierbei laufen Messungen vielfach über Nacht oder am Wochenende ohne eigenes Prüfstandspersonal. Die Sicherheit des Prüfbetriebs wird dabei meist in Form umfangreicher Grenzwertvorgaben erreicht, die allerdings testindividuell einen großen Eingabeaufwand erfordern. Die Grenzwerte sagen natürlich auch nur sehr bedingt etwas darüber aus, wie gut die so erhaltenen Daten sind.

Bei VW wurde in der Vergangenheit ein Abgastestverfahren entwickelt, das zumindest eine Plausibilitätsprüfung der Abgaswerte untereinander ermöglicht, und zwar schon während der Messung. Die Grundlage bildet die chemische Umsetzung von Kraftstoff mit Umgebungsluft.



Hierin bedeuten:

h': Wasseranteil der Luft L: Luftsauerstoffgehalt R: Innertgasanteil der Luft

Über die Einzelstoffbilanzen O_2 , H_2 , N_2 können die Verhältniszahlen a, b, m, x, y und z gelöst werden. Die Konsistenz der Abgasgrößen kann getestet werden, da der Zusammenhang

$$(k_{CO_2} + k_{CO} + 3k_{C_3H_8}) \cdot V = 1 \quad [10]$$

im stationären Betrieb immer erfüllt sein muss. k ist hierbei die Konzentration der Komponenten im trockenen Abgas, V bezieht sich auf das Abgasvolumen, das aus einem Mol Brennstoff (Gleichung 9) resultiert.

Mit dieser Gleichung lassen sich spezielle Einzelfehler an Abgasmessanlagen finden. Aber schon Falschluf in der Messleitung zum Abgasturm kann nicht mehr detektiert werden, sondern geht als höherer Lambdawert in die Gleichungen ein. Es fehlt die umfassende Verknüpfung verschiedener, voneinander unabhängiger Messwerte.

3.5 Bewertung der Verfahren

Im industriellen Umfeld gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten der Prozessüberwachung, die auf ganz unterschiedlichen mathematisch- logischen Ansätzen beruhen. Einige, die eine Verwandtschaft zu dieser Arbeit haben, sind in den letzten Abschnitten kurz dargestellt worden.

Die Nachbereitung von Stationärdaten ist eine standardisierte Vorgehensweise und bietet bei geringem Parametrieraufwand und Systemwissen eine gute Diagnosetiefe.

Einige der Zusammenhänge, die sich z.B. aus der Betrachtung von Scatterplots ergeben (Abbildung 3.2), können für die Arbeit aufbereitet und als Online-Diagnosewerkzeug benutzt werden. Es soll dabei aber nicht nur wie bisher der qualitative Zusammenhang geprüft werden, sondern es sollen anhand physikalischer Grundsätze auch die Zahlenwerte der beteiligten Messgrößen abgeschätzt werden. Die Wissensbasis wird also um den tatsächlichen physikalischen Sachverhalt erweitert.

Die Diagnosestrategien aus der Motorelektronik müssen zunächst analysiert und auf eine potentielle Verwendbarkeit hin untersucht werden. Das Hauptproblem, dass die verwendeten Modelle meist mit motorspezifischen Kennfeldern und Kennlinien ergänzt werden, grenzt ihre Verwendbarkeit deutlich ein.

Eventuell können hier verwandte Ansätze Verwendung finden. Sicherlich ist aber im Bereich der Allgemeingültigkeit ein hoher Aufwand nötig, um zumindest einige der vorhandenen Methoden übernehmen zu können.

Vor diesem Hintergrund sind auch die Einsatzmöglichkeiten der Parameterschätzverfahren kritisch zu hinterfragen. Neben der besseren Eignung an einfachen, elektro-mechanischen Systemen ist hier die Vielzahl von abzubildenden Stellgliedern in allen denkbaren Kombinationen als Nachteil zu werten. Das vorgestellte Luftmassenmodell, als Parameterschätzverfahren ausgeführt, wäre schon bei Verwendung alternativer Ventiltriebe nicht mehr verwendbar. Verschiedene AGR-Konzepte, Zylinderabschaltung oder Bypassventile zur Ladedruckregelung führen zu neuen Prozessmodellen, und müssten jeweils für den aktuellen Messauftrag parametrisiert und eigearbeitet werden. Ähnliches gilt für die Paritätsgleichungen, deren Wert für die Diagnose bereits vermessener Systeme unbestreitbar vorliegt.

Es müssen in dieser Arbeit folglich diejenigen Zusammenhänge erarbeitet und formuliert werden, die ein Maximum an Allgemeingültigkeit besitzen. Die Methoden müssen mit einem Minimum von Systemwissen und Parametrieraufwand lauffähig sein. Zur Bestätigung der erarbeiteten Konzepte ist eine umfangreiche Vermessung verschiedener Otto- und Dieselmotorkonzepte vorgesehen.

Das Selbe gilt für die Fehlerisolation, die ebenso mit einer beliebigen Anzahl und Zusammenstellung von Messdaten arbeitsfähig sein muss. Auf diesem Gebiet ist ein grundsätzlich neuer Ansatz notwendig, um der Variabilität und Flexibilität Rechnung tragen zu können.

Anhand der Aktivitäten auf dem Gebiet der Onlinediagnose, die sich gerade im Bereich von Industrie und Zulieferern entwickeln, kann auf den dringenden Bedarf eines solchen Werkzeugs an den immer öfter automatisiert laufenden Prüfständen geschlossen werden. Die vorliegende Arbeit soll einen wesentlichen Beitrag hierzu leisten.

4 Zusammenstellung der notwendigen Hauptarbeitsgebiete

Die Prüfung von Messdaten kann auf unterschiedlichste Art und Weise erfolgen. Die Methoden unterscheiden sich ganz wesentlich im Zeitpunkt der Durchführung, in ihrer Genauigkeit und ihrer Aussagefähigkeit.

Grundsätzlich lässt sich die Diagnose in drei Hauptgruppen aufteilen, die dann wiederum eine weitere Klassifikation zulassen. Diese Einteilung der Diagnose für Motorenprüfstände wurde bereits 1999 von Prof. Hohenberg [17] vorgestellt.

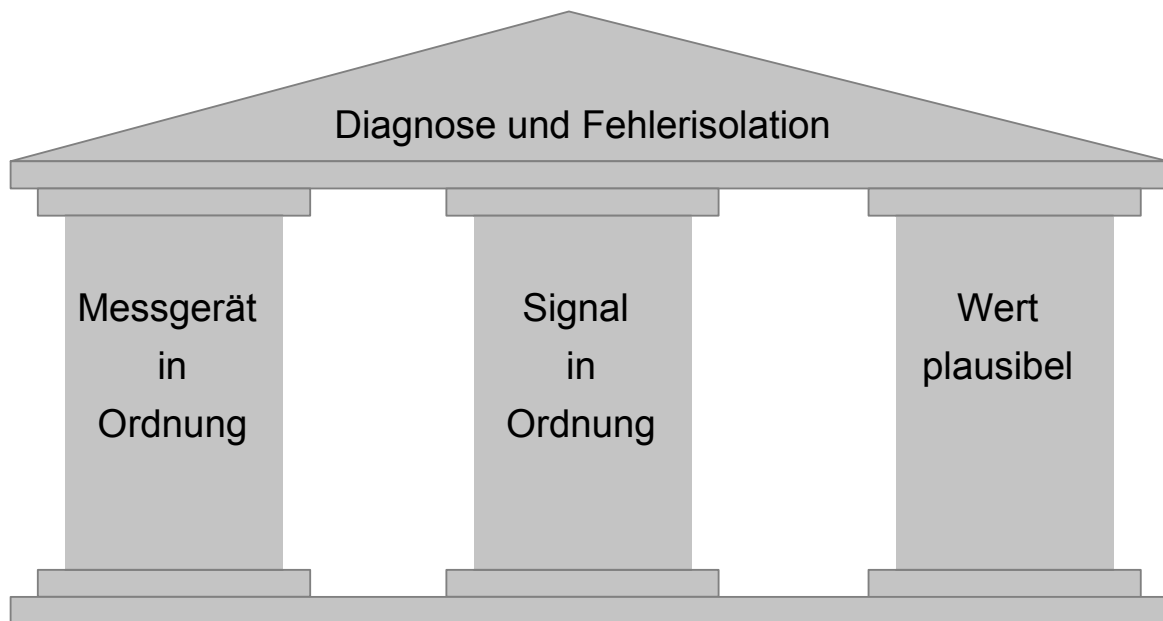


Abbildung 4.1: Säulen der Diagnose

Die erste Säule berücksichtigt die Überprüfung der Messgeräte selbst. Werte wie Innenwiderstände, Drücke und Temperaturen von Analysekamern lassen sich vielfach mit den vorhandenen Sensoren überprüfen. Randbedingung für diese Art der Prüfung ist eine ausreichend entwickelte Kommunikationsmöglichkeit der Prüfstandssoftware mit den Analysatoren des Prüfstandes.

Die zweite Säule beinhaltet die Analyse der Messsignale selbst. Hierunter ist eine statistische Beurteilung der Signalqualität zu verstehen. Ausreißer, die Messwertstabilität, Oszillationen oder die Standardabweichung können als Bewertungskriterium für ein Rohsignal verwendet werden. Die Art der Prüfung ist allerdings je nach Sensortyp und Motorbetriebszustand sehr unterschiedlich und bedarf für eine detaillierte Analyse eine sehr hohe Datenerfassungsrate.

Die dritte Säule behandelt die Fragestellung, ob der Messwert eines bestimmten Analysators oder Sensors plausibel ist, d.h. ob dieser Wert zu dem gerade eingestellten Betriebspunkt des Motors passt. Dies kann dadurch erreicht werden, dass mittels physikalischer oder empirischer Beziehungen eine analytische Redundanz aufgebaut wird. Rechenwerte werden hierbei direkt mit Messwerten verglichen, um eine Aussage über deren Richtigkeit zu erhalten.

Zur detaillierteren Darstellung der Randbedingungen sei hier exemplarisch die Struktur eines Motorenprüfstandes dargestellt:

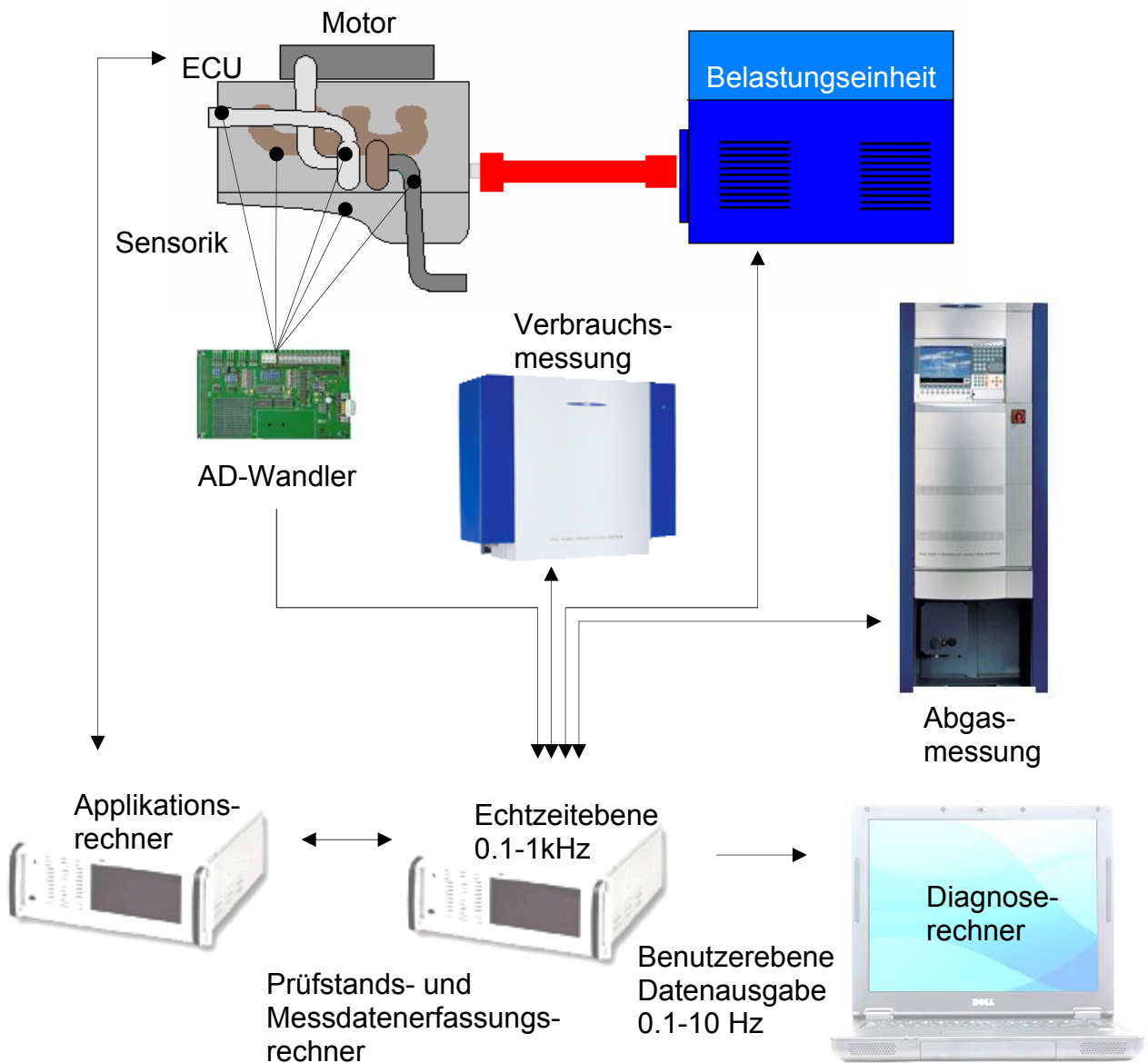


Abbildung 4.2: Prüfstandsstruktur

Motor und Belastungseinheit bilden dabei das Kernstück des Prüfstandes. Die Steuerung und Regelung der beiden Einheiten wird vom Prüfstandsrechner übernommen, meist begleitet von einem separaten Bremsenregler. Die Messtechnik lässt sich aufteilen in einfachere Sensoren wie Druck- oder Temperatursensoren, die direkt am Motor montiert sind, und die so genannten Sondermessgeräte wie Abgas- und Verbrauchsmessanlagen. Die Signale der ersten Gruppe gelangen nach Filterung und Digitalisierung hochfrequent in der Messdatenerfassung. Die Sondermessgeräte übertragen ihre Messwerte mit geringerer Übertragungsrate von

1-10 Hz. Die Datenleitung erlaubt allerdings gleichzeitig auch den Austausch weiterer Informationen wie Statusmeldungen oder Befehle zur Steuerung dieser Geräte.

Weitere Schnittstellen zum Motor bestehen in den Kommunikationspfaden mit der Motorsteuerung (ECU: Electronic Control Unit). Diese Kommunikation erfordert wiederum einen Zwischenrechner mit entsprechender Applikationssoftware.

Anhand der Aufstellung wird deutlich, dass die drei genannten Säulen der Diagnose auf ganz unterschiedliche Datenschnittstellen zurückgreifen müssen. Die Möglichkeiten, die Erfolg versprechend zur Überprüfung des Prüfstands herangezogen werden können, sollen im Folgenden dargelegt werden:

Grundlegende Prüfungen sollten noch vor Beginn der eigentlichen Messtätigkeit stattfinden. Über eine Statusabfrage aller eigendiagnosefähigen Messgeräte und der Überprüfung von charakteristischen Gerätegrößen (Innenwiderstände, Temperaturen, Durchflüsse) kann die Messbereitschaft vieler Analysatoren erkannt werden.

Ist der Motor gerade montiert worden, oder war über Nacht die Möglichkeit des Abkühlens gegeben, so kann eine gleichzeitige Plausibilitätskontrolle der Messdaten stattfinden. Die Temperaturen sollten alle übereinstimmen, auch sämtliche Drucksensoren, von wenigen Ausnahmen abgesehen, sollten Umgebungsbedingungen anzeigen. Gleiches gilt für Abgasmessgeräte, Drehzahl, Drehmoment, Verbrauch und Durchflusssensoren. Es kann nahezu die komplette 0-Punkt-Kalibrierung aller gängigen Kanäle überprüft werden.

Ebenfalls vor Testbeginn kann die Signalgüte frei von Motoreinflüssen beurteilt werden. Dies ist gerade bei Drucksensoren sehr hilfreich. Drücke im Saugrohr oder im Abgasstrang unterliegen den Druckschwankungen einer stetig schwingenden Gassäule, die in Amplitude und Frequenz stark variiert. Eine detaillierte Analyse der Amplituden- und Frequenzspektren ist damit bei laufendem Motor deutlich komplexer.

Um diese Informationsquelle nutzen zu können ist eine Erfassungsrate notwendig, die auch höhere Ordnungen der Motorgrundfrequenz beinhaltet. Bei entsprechender Zylinderzahl und Drehzahl überschreitet die erforderliche Abtastrate unter Berücksichtigung des Abtast-Theorems deutlich 1 kHz. Solche Werte werden bislang nur von wenigen Forschungsprüfständen bereitgestellt. Die entsprechenden Algorithmen müssen direkt in die Echtzeitebene integriert werden. Ansätze zu diesen Arbeiten können in [22] nachgelesen werden, sind aber aufgrund der zurzeit im industriellen Umfeld vorliegenden Randbedingungen nicht in diese Arbeit aufgenommen worden.

Wenn der Motor läuft, kann die Richtigkeit der Messgrößen ansonsten noch mittels verschiedener physikalisch oder empirisch basierter Modelle überprüft werden. Es kommen Bilanzgleichungen von Masse und Energie, Grenzwertüberwachungen, Turboladermodelle, die Überwachung von Schlüsselgrößen (Gesamt- und Teilwirkungsgrade, Reibwerte, Druckverlustziffern etc.) und verschiedene andere Motorteilmodelle zum Einsatz. Diese Modelle sind aufgrund der vorliegenden Rechnerleistung und der zur Verfügung stehenden Schnittstelle Mittelwertmodelle, d.h. die hochfrequente zeitliche Änderung der Messgrößen gehen nicht in die Betrachtung ein.

Es ist dabei zu unterscheiden, ob diese Modelle im gesamten Prüflauf oder nur in Stationärpunkten gültig sind. Es muss also die Stationarität des Motors und die Beharrung verschiedener Schlüsselgrößen überwacht werden. Hierzu ist eine so genannte Beharrungserkennung notwendig.

Diese Beharrungserkennung ist weiterhin notwendig, um die Stabilität der Messwerte innerhalb der Messung zu gewährleisten.

Dynamische Modelle können kontinuierlich aktiv bleiben, die stationär gültigen Modelle hingegen schalten sich automatisch zu, wenn die Kriterien dafür erfüllt sind.

Unabhängig von Motortyp und Erfassungsrate kann mittels einer Reproduzierbarkeitsmessung eine weitere wichtige Information über die zeitliche Veränderung der Sensorik oder des Motors erfolgen. Ein automatisches Abfahren verschiedener Referenzpunkte kann selbst kleine Veränderungen in der Kalibrierung oder im Motorverhalten aufdecken. Eine solche Prüfung kann vollautomatisch in bestehende Prüfstandssysteme eingearbeitet werden.

Letztlich soll der Prüfstandsfahrer auch noch die Hilfestellung erhalten, wo die Fehler zu suchen, bzw. zu finden sind. Hierzu ist eine übergeordnete Entscheidungsinstanz nötig, die anhand der gewonnenen Symptome eine Ausgabe über die potentiellen Fehlerursachen entwickelt.

Die Bereitstellung der Daten ist auf den zurzeit üblichen Prüfständen nur in der Benutzerebene möglich. Erst die neuesten Prüfstandssysteme erlauben einen ungehinderten Zugang zu den Daten der Echtzeitebene und den Kommunikationsmöglichkeiten mit den Sondermessgeräten.

Aus diesem Grunde beschränkt sich die folgende Arbeit im Wesentlichen auf die dritte Säule der Diagnose, nämlich die Plausibilität der Messdaten. Die meisten Plausibilitätsprüfungen können auch bei Erfassungsraten von weniger als 1 Hz ohne Einschränkung durchgeführt werden. Die Beurteilung der Signalgüte und der Messgeräte wird den Randbedingungen entsprechend in geringerem Umfang bearbeitet.

Es werden die folgenden Punkte bearbeitet:

- Statische Funktionsprüfung bei Motorstillstand
- Beharrungserkennung zur Beurteilung der Stationarität der Messdaten
- Bildung von Motorteilmodellen zur Prüfung der Plausibilität von Messgrößen bei laufendem Motor (Mittelwertmodelle)
- Entwicklung eines Fehlerisolationsmechanismus für die Fehlerausgabe am Bildschirm

In aktuellen Arbeiten am Fachgebiet VKM wird auf diese zusätzlichen Punkte eingegangen, die aber noch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

- Geräteüberprüfung bei Motorstillstand und gefeuertem Betrieb
- Hochfrequente statistische Betrachtung der Signale

- Bildung von Plausibilitätsmodellen durch Analyse der hochfrequenten Signalanteile
- Automatisierte Referenzpunktanalyse

Sämtliche Teilaspekte sind vor dem Hintergrund zu entwickeln, dass sich sowohl der Motortyp als auch die Messkanalbestückung, d.h. die Anzahl und die Art der Messgrößen, täglich ändern können. Feste Entscheidungsstrukturen, Fehlerbäume oder Mustererkennung stoßen hierdurch schnell an ihre Grenzen.

Die Parametrierung des Programms auf eine neue Prüfaufgabe muss sehr schnell erfolgen können, wenn das System im realen Prüfbetrieb Erfolg haben soll. Jeder vermeidbare Aufwand führt zur Inakzeptanz und damit zur Missgunst bei den Anwendern.

5 Randbedingungen

Eine Diagnose von Motormessdaten kann auf physikalischer oder logischer Basis nur dann erfolgen, wenn die einzelnen Kanäle bestimmten physikalischen Größen am Motor zugeordnet werden können. Dies erfordert eine Normierung der Namen oder die Einführung bestimmter Messklassen. Eine solche Normnamenliste ist Basis für die Identifikation aller Größen, die einer jeden Prüfaufgabe vorweg gehen muss.

Außerdem ergibt sich mit der Einführung einer solchen Liste die Möglichkeit, Wissen in Form von Erfahrungswerten, Grenzwerten und Bewertungsgrößen einer jeden Messgröße zuzuordnen. Es hat sich gezeigt, dass eine solche Liste wesentlicher Bestandteil der Prüfstandsdiagnose ist. Im Folgenden ist mehrfach von einer Datenbank die Rede, die diese Zuordnung von Wissen zu verschiedenen Messgrößen beinhaltet. Auf die genaueren Inhalte wird noch im Detail eingegangen.

Eine weitere Randbedingung für das Funktionieren physikalisch basierter Diagnosemethoden ist die Umrechnung sämtlicher Größen auf internationale SI-Einheiten. Mittels eines separaten Unterprogramms können eine Vielzahl von Einheiten automatisch identifiziert und umgerechnet werden. Dies beinhaltet neben einfacheren Dingen wie die Umrechnung von °Celsius in Kelvin, die Umrechnung von mg/Hub in Massenströme, die als solche schon eine Zuordnung von Zylinderzahl und Drehzahl des Motors erfordert. Gerade die ECU-Größen, die häufig einen nahezu redundanten Messdatensatz beinhalten, erfordern hierbei größere Aufmerksamkeit.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Umrechnung der mal feucht, mal trocken gemessenen Abgasgrößen auf die tatsächlichen Werte im Abgasstrang des Motors. Für sämtliche Bilanzgleichungen ist dieser Aspekt von entscheidender Wichtigkeit, weswegen in Kap. 6.3.1.1 noch einmal darauf eingegangen wird.

Aus dem Prüfumfeld heraus erwachsen wiederum ganz andere Randbedingungen. Es sind die Motoren und Messpläne, die mitunter zweimal am Tag wechseln können. Auf modernen Palettensystemen dauert der Wechsel von einem Motor zum nächsten ca. eine halbe Stunde. Wesentliche Bestandteile der Messtechnik werden auf diesen vormontierten Paletten mitgeliefert. Der Prüfstandsfahrer wird folglich mit jedem

neuen Motor auch mit neuer Messtechnik konfrontiert. War beim letzten Motor noch eine komplette Abgasvermessung vorhanden, so kann beim nächsten Motor schon eine Vermessung der Turboladerdrehzahl Schwerpunkt der Arbeit sein. Durch den jeweiligen Wechsel eines Teils der Messkette können weder die Kenntnis der digitalen Auflösung, noch die Messbereiche der Sensoren, als bekannt vorausgesetzt werden. Das Programm muss dementsprechend variabel in der Konfiguration sein, und sich nötige Randinformationen selbstständig erarbeiten.

6 Erläuterung der vier Hauptarbeitsgebiete

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Unterfunktionen näher erläutert, die in Kombination in einer Softwarelösung verschmolzen sind und die Funktionsfähigkeit am Prüfstand bereits unter Beweis gestellt haben.

6.1 Statische Funktionsprüfung

Die statische Funktionsprüfung erhält ihre Rechtfertigung durch die Problematik, dass eine genauere Signalanalyse und Kontrolle der Kalibrierung verschiedener Größen, bei laufendem Motor nicht mehr in dieser Eindeutigkeit möglich ist.

So kann z.B. bei einer Öltemperatur, die bei betriebswarmem Motor 80°C anzeigt, nicht ausgeschlossen werden, dass 120°C der richtigere Wert wäre. Es ist also stets ein großer Bereich der Unsicherheit vorhanden. Es ist natürlich wünschenswert, eine genauere Fehlerangabe als 40°C darstellen zu können.

Hierzu stehen eine ganze Reihe verschiedener Überprüfungsmöglichkeiten zur Verfügung, die Elemente aller 3 Säulen der Diagnose beinhalten. Die Methoden unterscheiden sich aber deutlich von denen, die bei laufendem Motor notwendig sind.

Die besonderen Randbedingungen der statischen Funktionsprüfung sind:

- Der Motor liegt neu montiert am Prüfstand vor oder
- Der Motor konnte über Nacht Umgebungsbedingungen annehmen
- Die Messgeräte sind alle kalibriert und betriebsbereit
- Der Motor bleibt für die Dauer des Tests (20s) ausgeschaltet

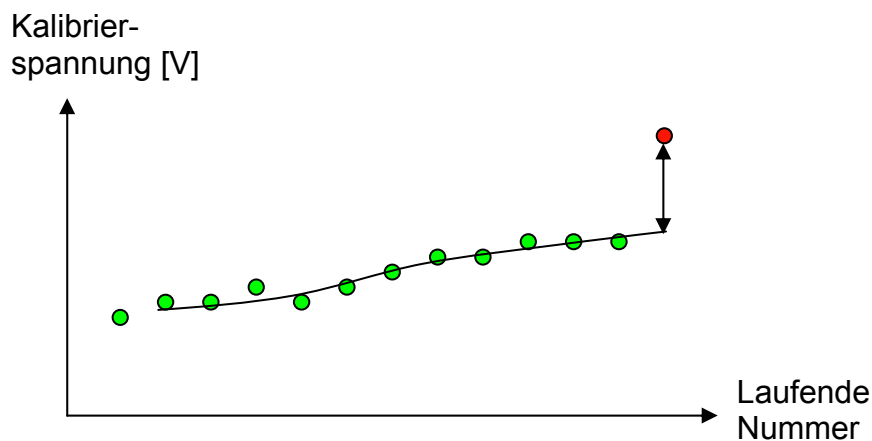
Unter diesen Bedingungen kann eine sehr genaue Analyse der Messgeräte erfolgen. Auch die fehlende Beeinflussung durch den Motor macht bei manchen Sensoren eine sehr viel genauere Plausibilitätsprüfung möglich als bei gefeuertem Motorbetrieb.

6.1.1 Überwachung des Kalibrierprozesses

Auf Geräteseite konnte bislang die Überprüfung und Sicherstellung des Kalibrierprozesses der Abgasmessanlagen umgesetzt werden. Die Notwendigkeit erklärt sich unter Berücksichtigung der in Kap. 2 dargestellten Fehlerhäufigkeit dieser komplexen Messgeräte, die fast für die Hälfte der auftretenden Fehler verantwortlich sind. Mittels einer kleinen Datenbank kann eine Historie aller Kalibrierwerte der Analysegeräte aufgebaut werden, so dass schon kleinere Fehler vor einem potentiellen Geräteversagen entdeckt werden können.

Vorteilhaft ist an dieser Stelle, dass es sich bei diesen Messgeräten um prüfstandseigene Geräte handelt. Sie unterliegen daher auch nicht den Änderungen der sonstigen Sensorik, die mit jedem neuen Motor mitgeliefert wird. Die Bedingungen für eine dauerhafte Datenbeobachtung sind also sehr gut und rechtfertigen den einmaligen Aufbau und die Einrichtung der entsprechenden Dateien. Da der Zusatzaufwand nur einmalig erfolgt, steht er auch nicht der Einführung dieses Systems im Wege.

Als Beispiel für die Nutzbarkeit dieser Daten sei im Folgenden die Kalibrierspannung eines CO-Analysators für das stets gleiche Prüfgas dargestellt:



6.1.2 Grenzwertüberwachung

Die meisten Messdaten nehmen im Prüfstandsstillstand charakteristische Werte an, die man als Umgebungsbedingungen bezeichnen kann. Dies betrifft z.B. die Temperaturen, die sich alle um die Umgebungstemperatur herum bewegen müssen. Aus dieser Idee resultiert die Abfrage von Grenztemperaturverletzungen, die z.B. außerhalb von 20 und 25°C liegen. Bei luftkonditionierten Prüfständen kann ein solches Fenster natürlich enger gesteckt werden, wodurch die Fehlererkennung empfindlicher wird.

Ähnliches kann bei der Überwachung von Drücken angewandt werden, die auch alle Umgebungsdruck anzeigen müssen. Ein Unterschied zu den Temperaturen besteht allerdings: Die Messung der Drücke kann absolut oder relativ zur Umgebung erfolgen, was eine automatische Erkennung notwendig macht. Hierzu werden die Drücke in Gruppen um 0, und in eine andere Gruppe um 1000 mbar sortiert und getrennt ausgewertet. Für die physikalische Plausibilität bei laufendem Motor kann an dieser Stelle die wichtige Information gewonnen werden, wie die einzelnen Druckkanäle auf Absolutdruck umzurechnen sind. Eine Benutzereingabe kann somit für diesen Fall umgangen werden.

Die Abgasanalysatoren müssen bei stillstehendem Motor Werte liefern, die denen der Frischluft gleichen, d.h. die Spurengase müssen 0, der Kohlendioxydanalysator 0.05 und der Sauerstoffanalysator 20.8% anzeigen.

Des Weiteren sollten alle Durchflussmessgeräte wie Verbrauch oder Luftmasse, die Drehzahl und auch das Drehmoment 0 anzeigen.

Allerdings sind die Messgeräte nicht so genau, dass all diese Werte exakt eingehalten werden können. Aus diesem Grunde ist jeweils sowohl ein Minimalwert als auch ein Maximalwert angegeben, der als Expertenwissen im Hintergrund abgelegt ist.

6.1.3 Vergleich der Werte untereinander

Die Grenzwertabfrage, die nur zur Analyse grober Fehler oder Sensorausfälle herangezogen werden kann, wird in einem nächsten Schritt um den Vergleich verschiedener Werte ergänzt.

Vergleichen lassen sich am Prüfstand in der Regel nur Drücke und Temperaturen, da diese Sensoren in einer größeren Anzahl zum Einsatz kommen. Nachdem Kanäle mit Grenzwertverletzungen erkannt und aussortiert sind, werden also nur noch richtige oder fast richtige Kanäle betrachtet. Durch Medianwertbildung dieser Werte kann eine repräsentative Umgebung berechnet werden, da eventuell auftretende Ausreißer bei der Medianwertbildung keinen Einfluss ausüben.

Damit steht nun eine Referenzgröße zur Verfügung, die eine sehr viel präzisere Fehleranalyse ermöglicht als die vorherige Grenzwertüberwachung. Durch Differenzbildung der Einzelkanäle mit dem "wahren" Wert werden Fehlkalibrierungen oder Übergangswiderstände entdeckt.

Die kommende Abbildung zeigt einen solchen Fall. 4 Temperaturen sind fehlerfrei, eine Fünfte ist durch Übergangswiderstände ungenau. Die Medianwertbildung führt

dennoch zu einer repräsentativen Referenztemperatur, die eine Lokalisierung des fehlerhaften Temperatursensors ermöglicht.

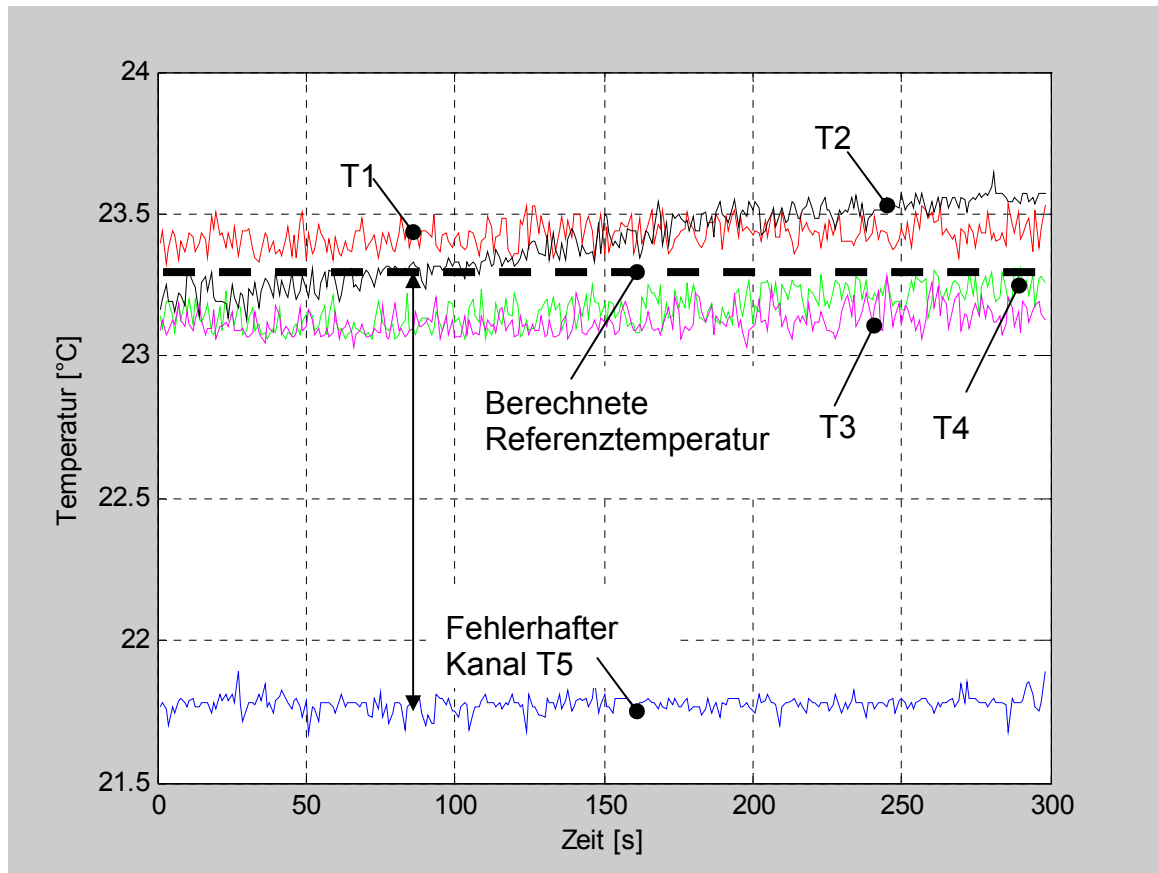


Abbildung 6.2: Fehlerfindung durch Wertevergleich

Berücksichtigt werden muss weiterhin die digitale Auflösung der AD-Karte in Verbindung mit dem Messbereich, da daraus eine minimale Differenz zwischen zwei Temperaturpunkten oder Druckpunkten resultiert. Liegt diese Differenz über der geforderten Abweichung zwischen den verschiedenen Drücken oder Temperaturen, so wird der Grenzwert für den betreffenden Kanal automatisch angepasst, so dass eine übereilte Fehlermeldung vermieden wird.

Beispiel:

Bei einer Messkonfiguration für den Öldruck ist der Sensor für einen Messbereich von 0-10 bar ausgelegt. Die dazugehörige AD-Wandlerkarte verfügt über eine Auflösung von 10 Bit. Dies entspricht einer Schrittweite von 9.7 mbar. In diesem Fall würde eine Vorgabe von 5mbar als maximal zulässige Abweichung vom Referenzwert eine unangebrachte Fehlermeldung auslösen. Die Analyse der digitalen Auflösung zeigt das Problem auf, d.h. es wird automatisch eine Abweichung um ein Inkrement (9.7mbar) vom Referenzwert zugelassen. Die Fehlermeldung wird unterdrückt.

Die digitale Auflösung muss dem Programm nicht mitgeteilt werden, sondern es findet innerhalb der Stillstandsmessung eine Analyse des kleinsten gefundenen Inkrements statt. Da die Kanäle meist ein Rauschen um ein bis zwei digitale

Zifferschnitte aufweisen, kann diese Analyse sehr einfach erfolgen und bedarf keinerlei Eingabe seitens des Prüfstandspersonals.

6.1.4 Messwertstabilität

Der Begriff "Messwertstabilität" beschreibt die Änderung, die der Messwert in einem bestimmten Zeitfenster durchläuft. Ist der Prüfstand längere Zeit ausgeschaltet, z.B. über Nacht, so darf ein Analysator idealerweise keine Veränderungen in seinem zeitlichen Verhalten zeigen. Diese Eigenart kann mit einer Kurvenapproximation und anschließender Kurvendiskussion bewertet werden.

Die Änderung des Messwertes wird auf 10 Minuten extrapoliert und mit entsprechenden Grenzwerten verglichen. Die Extrapolation erfolgt dabei nach einer Systemidentifikation, wobei ein PT1-Verhalten vorausgesetzt wird. Dies ist gerade bei Temperatursensoren häufiger anzutreffen, die sich in der Nähe von sich aufwärmenden Messgeräten befinden. Sie weichen dann wenige Grad Celsius von der Umgebung ab. Das PT1-Verhalten berücksichtigt den abklingenden Gradienten, so dass eine eher konservative Abschätzung und Fehlerausgabe stattfindet.

Hierbei ist noch Folgendes zu beachten:

Eine Drift kann erst dann quantifiziert werden, wenn der Messwert mehr als 3 digitale Inkremente durchschritten hat. Die Einflussnahme der digitalen Auflösung illustriert das folgende Bild.

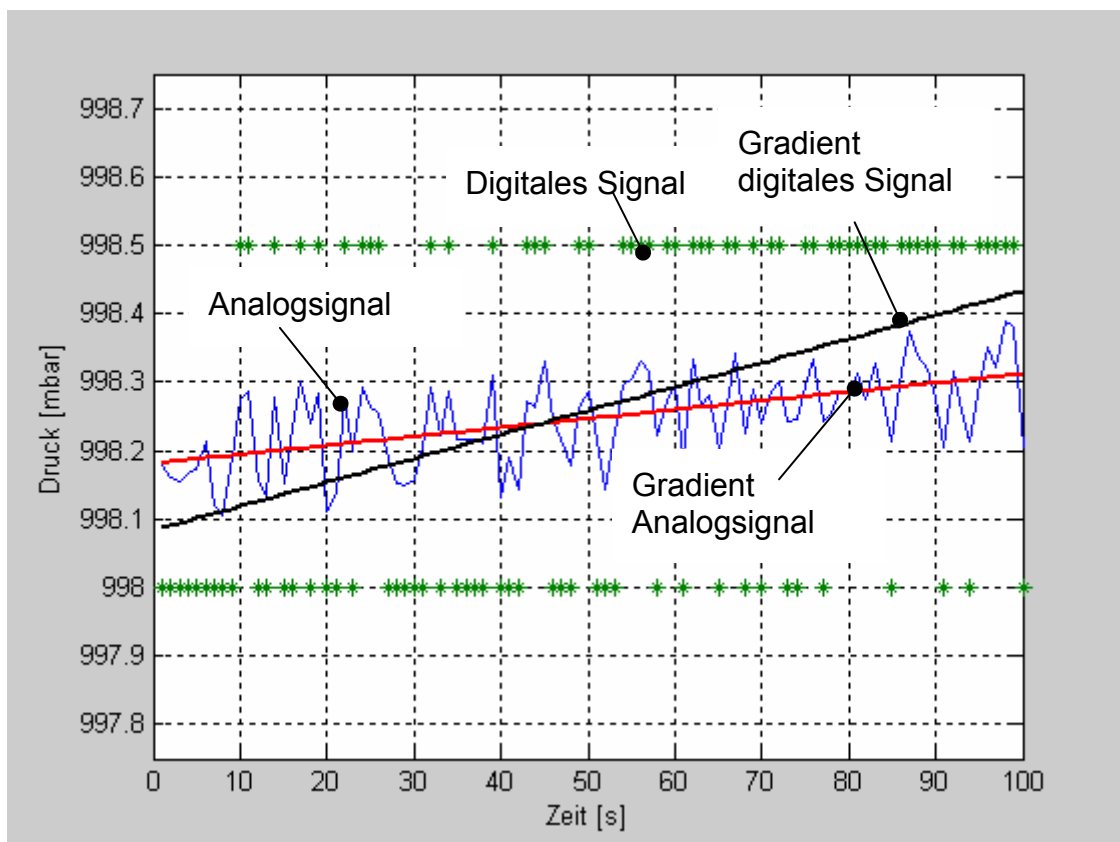


Abbildung 6.3: Beurteilung der Drift bei grober Messbereichsauflösung

Es ist deutlich zu sehen, dass der Gradient des digitalen Signals nahezu doppelt so groß ist wie der Gradient des analogen Rohsignals. Die tatsächlichen Verhältnisse werden also nicht richtig wiedergegeben.

Bei nur zwei Inkrementen besteht wie in der dargestellten Grafik die Möglichkeit, dass eine unwesentliche Drift des Analogsignals in der Mitte zwischen zwei Stufen eine viel größere Drift im aufgezeichneten Signal hervorruft. Das Signal wird in diesem Fall auf viel weiter auseinander liegende digitale Werte umgeschrieben. Dieser als Digitalisierungsrauschen bekannte Zusammenhang kann bei ungünstiger Lage des Analogsignals zu rechnerisch überhöhten Gradienten führen. Die digitale Auflösung ist daher zu berücksichtigen, um entsprechend unnötige Fehlermeldungen zu vermeiden.

6.1.5 Untersuchung der Standardabweichung

Neben der Drift ist das Rauschen der Messwerte eine Eigenart, die nicht restlos verhindert werden kann. Allerdings ist die Stärke des Rauschens ein Maß, das für eine Diagnose herangezogen werden kann. Bei Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich je nach Prüfstand und Sensortyp eine charakteristische Rauschstärke einstellt. Die folgende Grafik illustriert diese Ähnlichkeit am Beispiel von 5 NiCrNi-Thermoelementen.

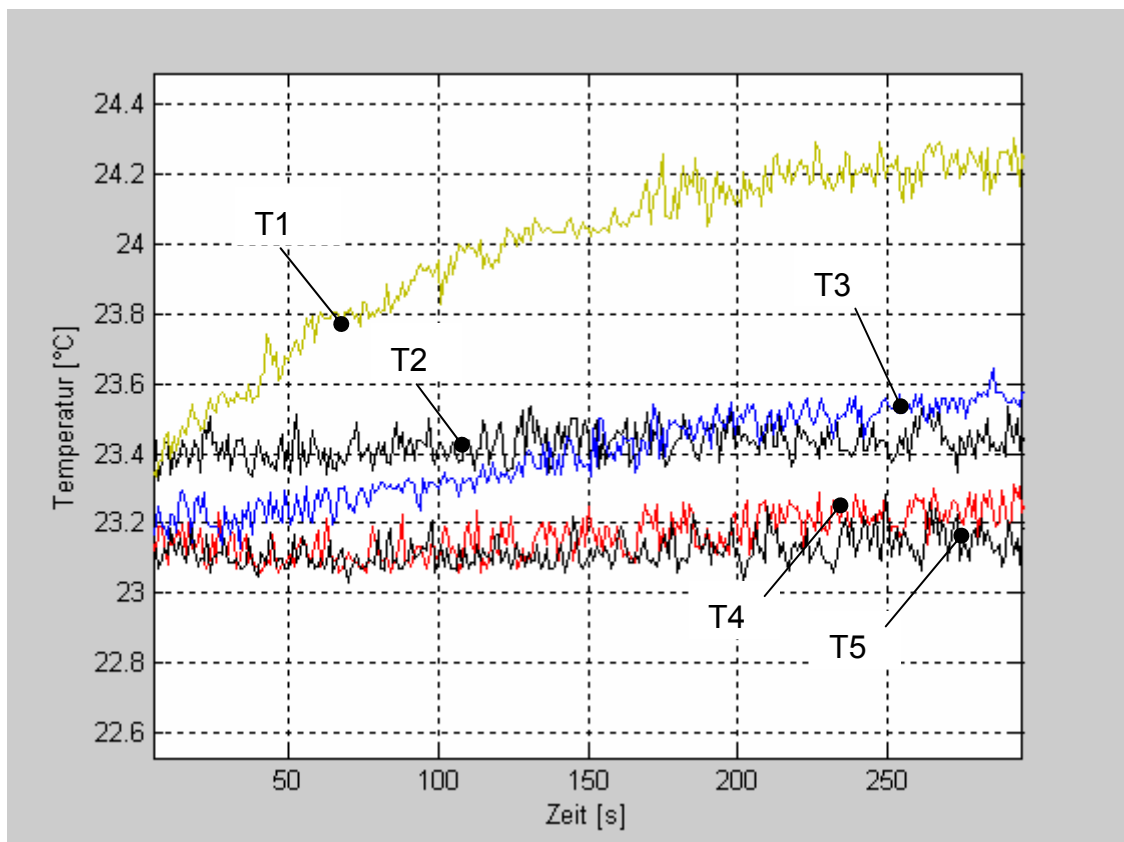


Abbildung 6.4: Vergleich verschiedener Temperaturen

Wird die Messkette zum Beispiel aufgrund von magnetischen Störfeldern aus Hochstromanwendungen (Belastungseinheiten) gestört, kann die Ausprägung dieser Kanalcharakteristik deutlich abweichen. Bei NiCrNi-Thermoelementen beträgt sie an VKM-Prüfständen z.B. 0.012% vom Messbereichsende. Als Maß für die Rauschstärke wird die Standardabweichung verwendet. Bei der Berechnung und Diagnose der Standardabweichung sind zwei wichtige Aspekte zu unterscheiden und zu berücksichtigen:

Drift:

Das eigentliche Messrauschen kann nur dann sinnvoll berechnet werden, wenn das Signal driftfrei ist. Ansonsten wird der Wert der Standardabweichung dominiert durch den Einfluss der zeitlichen Änderung des Messwertes.

Um aber eine eindeutigere Fehleranalyse durchführen zu können, sollen in diesem Programm die reinen Rauschwerte ohne Drift untersucht werden, da dies ja schon in einem separaten Programnteil erfolgt ist.

Wie man auf der Abbildung 6.4 erkennen kann, haben alle NiCrNi-Elemente eine gleichartige Rauschcharakteristik. Würde man die Standardabweichung ohne vorherige Driftkorrektur berechnen, so ergäbe sich für die Temperatur T1 eine Standardabweichung, die um den Faktor 7 größer ist als die der anderen Sensoren. Dies würde ein falsches Bild des Sensors liefern. Deswegen wird der Messverlauf zunächst mit einer Kurvenapproximation belegt, und der Unterschied zwischen Kurve und Messdaten neu berechnet. Das Resultat ist ein driftfreier Messdatenverlauf mit seiner ursprünglichen Rauschcharakteristik. Abbildung 6.5 zeigt das Ergebnis dieser Vorgehensweise.

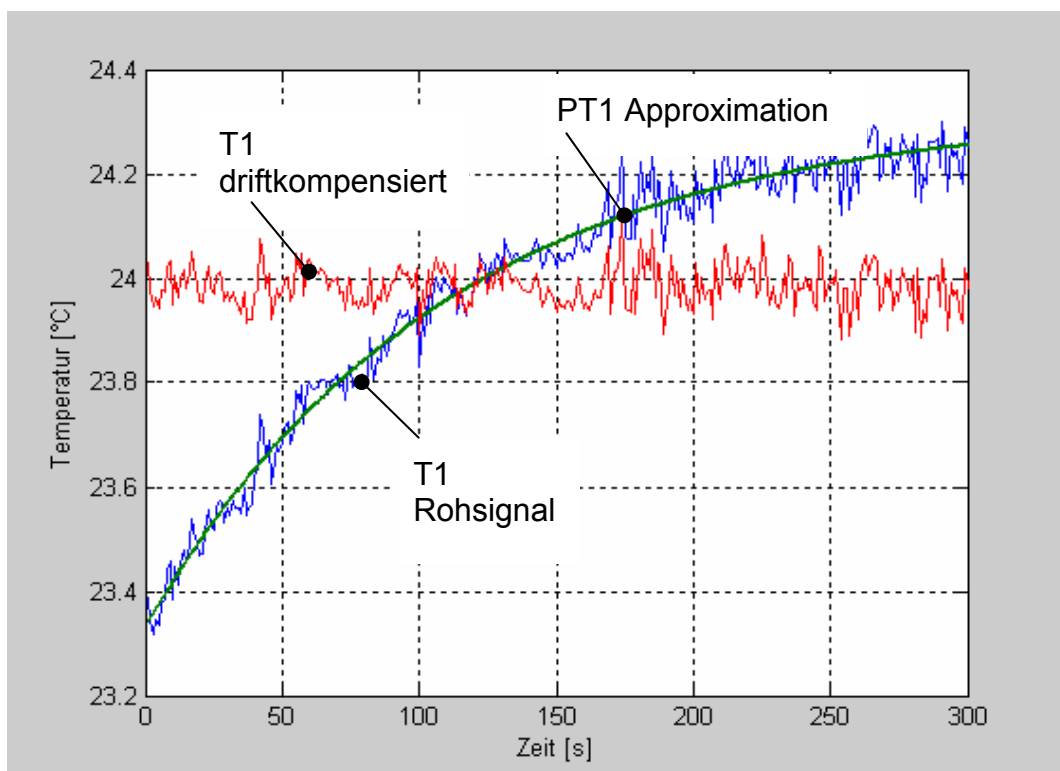


Abbildung 6.5: Beurteilung driftender Kanäle

Anhand des jetzt vorliegenden Signals kann eine detailliertere Aussage über mögliche Ursachen getroffen werden. Die Messkette als solche scheint in diesem Falle in Ordnung zu sein. Es liegt allerdings eine deutliche Temperaturdrift am Sensor vor, die z.B. auf eine in unmittelbarer Nähe montierte beheizte Lambdasonde zurückgeführt werden kann. Hierdurch wird die eigentlich interessante Abgastemperatur nicht ganz richtig wiedergegeben.

Digitale Auflösung:

Bei der Kontrolle der Standardabweichung ist wiederum die Analyse der digitalen Auflösung notwendig. Dies kann auf das so genannte Digitalisierungsrauschen zurückgeführt werden, das bei ungünstiger Lage des Analogsignals zu den digitalen Werten eine deutlich höhere Standardabweichung hervorruft als es das analoge Signal tatsächlich zeigt. Dies ist in der folgenden Grafik illustriert. Die maximal mögliche Erhöhung der Standardabweichung liegt bei einer halben digitalen Schrittweite.

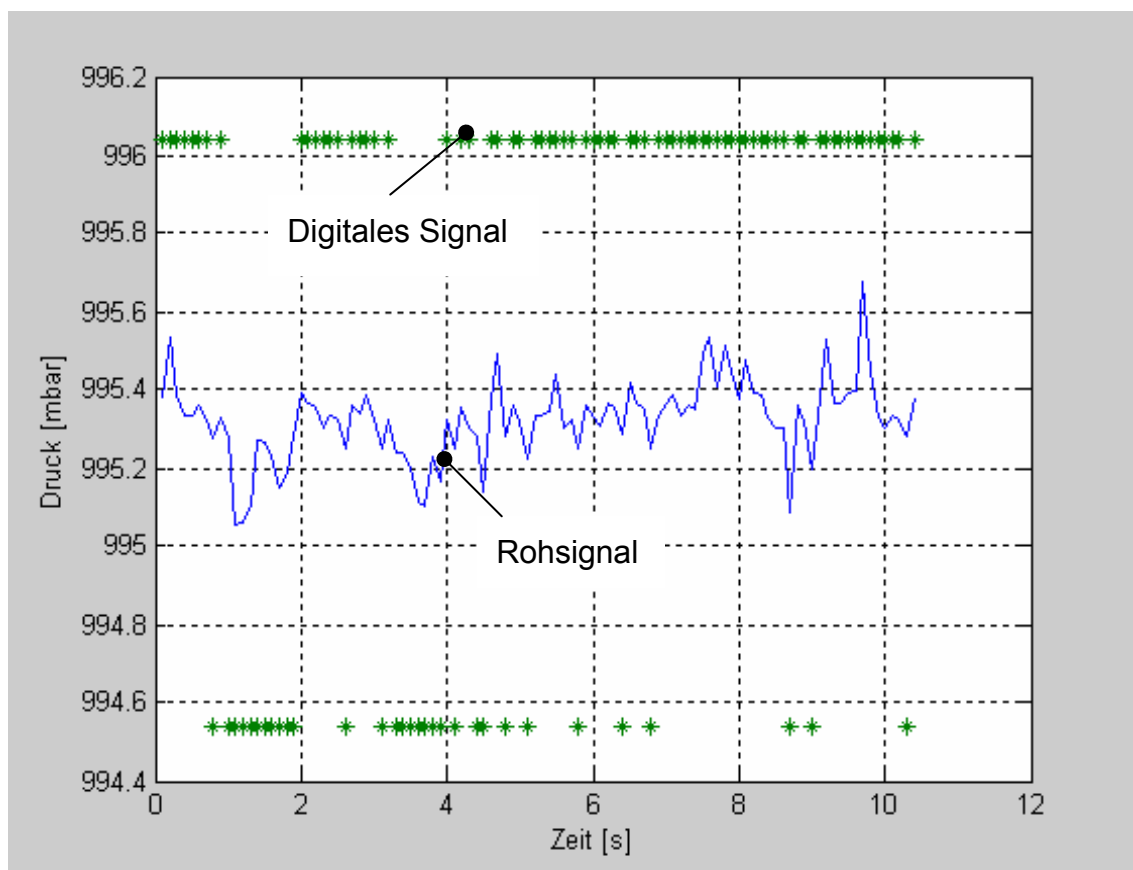


Abbildung 6.6: Digitalisierungsrauschen

Dieses Phänomen ist häufig bei Drucksensoren anzutreffen. Bei Druckaufnehmern von 0-10bar und AD-Karten mit weniger als 12 Bit kann die Standardabweichung schon deutlich über den gewünschten Grenzwerten für das Rauschverhalten liegen.

Sämtliche Grenzwerte, also die Minimal- und Maximalwerte, die erlaubte Standardabweichung sowie die maximal erlaubte Drift, liegen in einer Datenbank vor

und basieren auf der Vermessung verschiedenster Prüfstände. Da die Messgeräte auch bei unterschiedlichen Firmen stets sehr ähnlich sind, ist eine nachträgliche Modifikation dieser Daten kaum nötig.

Abgastemperaturen werden z.B. typischerweise immer mit NiCrNi-Thermoelementen vermessen, wohingegen Öl, Wasser und Ansauglufttemperaturen stets mit PT100 Thermoelementen vermessen werden. Auch bei den übrigen Messgeräten liegt eine sehr ähnliche Messausstattung in den verschiedenen Firmen vor.

6.2 Beharrungserkennung

Das Programm wurde entwickelt unter der Randbedingung, dass der Zusatzaufwand für das Prüfstandspersonal sehr gering ausfallen soll. Physikalische Modelle haben aber die Eigenart, viele Randbedingungen zu beinhalten wie Wärmekapazitäten, Geometrien, Volumina etc. Dies steht aber im direkten Widerspruch zu dem geforderten geringen Parametrierungsaufwand.

Eine Lösung ergibt sich, wenn lediglich die stationären Anteile der Gleichungen betrachtet werden, was diese meist erheblich vereinfacht.

Als Beispiel sei hier die Kohlenstoffbilanz genannt, die in einem späteren Kapitel noch ausführlicher behandelt wird. Es wird eine Systemgrenze um den gesamten Motor gezogen. Kohlenstoff wird über den Kraftstoff und in kleinen Mengen über die Frischluft zugeführt. Über das Abgas verlässt der Kohlenstoff den Motor in verschiedenen gasförmigen Verbindungen.

Um Kohlenstoffmassenströme an einer Systemgrenze berechnen zu können, sind stets die Gesamtmassenströme im entsprechenden Querschnitt notwendig.

Der Kohlenstoffmassenstrom aufgrund der CO₂-Emission im Abgasrohr berechnet sich aus

$$\dot{m}_{\text{Kohlenstoff}} = g_{\text{CO}_2} * \dot{m}_{\text{Abgas}} * \frac{M_c}{M_{\text{CO}_2}} \quad [11]$$

Im stationären Motorlauf entspricht die Abgasmasse der Summe aus Frischluft- und Kraftstoffmassenstrom, liegt also als Messwert vor.

Im transienten Betrieb hingegen müsste die Abgasmasse z.B. auch aus diesen Größen berechnet werden. Allerdings müssten zusätzliche Ansätze wie z.B. Befüll- und Entleermethode oder Charakteristikenverfahren [27] angesetzt werden, um zum zeitlich aktuellen Abgasmassenstrom zu gelangen. Dies erfordert aber bereits im einfachsten Fall sämtliche Gasrohrängen und Volumina im Ansaug- und Abgasbereich. Weiterhin erhöht sich die Anzahl der Eingangsgrößen um Hubvolumen und Motordrehzahl.

Gleichzeitig ist eine Identifikation des Übertragungsverhaltens der Abgas, Luft und Kraftstoffmessung erforderlich, um eine Zeitsynchronisation der Werte zu erreichen. Eine Berechnung kann also auch stets erst im Nachhinein erfolgen, wenn der Motor unter Umständen schon stationären Betrieb erreicht hat.

Die zusätzliche Komplexität der Modelle, der ungleich höhere Rechenaufwand sowie die deutlich aufwändigere Parametrierung des Versuchs rechtfertigen diese Vorgehensweise in Anbetracht des nur gering höheren Nutzens nicht. Aber auch die

Erhöhung der Anzahl von Eingangsgrößen macht eine spätere Fehlerisolation schwieriger, was als weiterer entscheidender Nachteil zu werten ist. Jede in ein Modell eingehende Größe ist gleichzeitig potentielle Ursache von Unstimmigkeiten innerhalb dieses Modells. Aus diesem Grunde werden Modelle mit wenigen Eingangsgrößen bevorzugt.

Für die meisten Plausibilitätsbetrachtungen wurde aus den genannten Gründen auf die dynamische Modellbildung verzichtet. Die entsprechenden stationär gültigen Modelle müssen daher im transienten Betrieb abgeschaltet werden.

Mittels einer Beharrungserkennung muss folglich zwischen dynamischem und stationärem Motorlauf unterschieden werden. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug, das mittels eines mathematischen Verfahrens (Gradientenbildung, Systemidentifikation, Endwertberechnung) diese notwendige Unterscheidung trifft.

Das Verfahren wird bei den Betriebszuständen nach Lastpunktwechsel (M_d , n , α) und Parametervariation (AGR, ZZP...) eingesetzt. Neben dem transienten Betrieb mit Sollwertänderungen muss auch die Dauer des Kaltstarts detektiert werden, da die Gültigkeit verschiedener empirischer Modelle einen betriebswarmen Motor voraus setzt. Dies sind z.B. Öldruck- oder Abgasmodelle.

Dies erklärt aber nur zu Teilen die Notwendigkeit einer solchen Entwicklung. Neben der Aktivierung und Deaktivierung von Programmteilen sind auch die Steigerung der Datengüte und das Potential der Messzeiteinsparung gegeben.

6.2.1 Grundsätzliches zum Messablauf

Bei normalen Motorvermessungen zum Zwecke der Basisapplikation und zur Analyse des Abgasverhaltens wird der Motor in einer Vielzahl von Stationärpunkten vermessen.

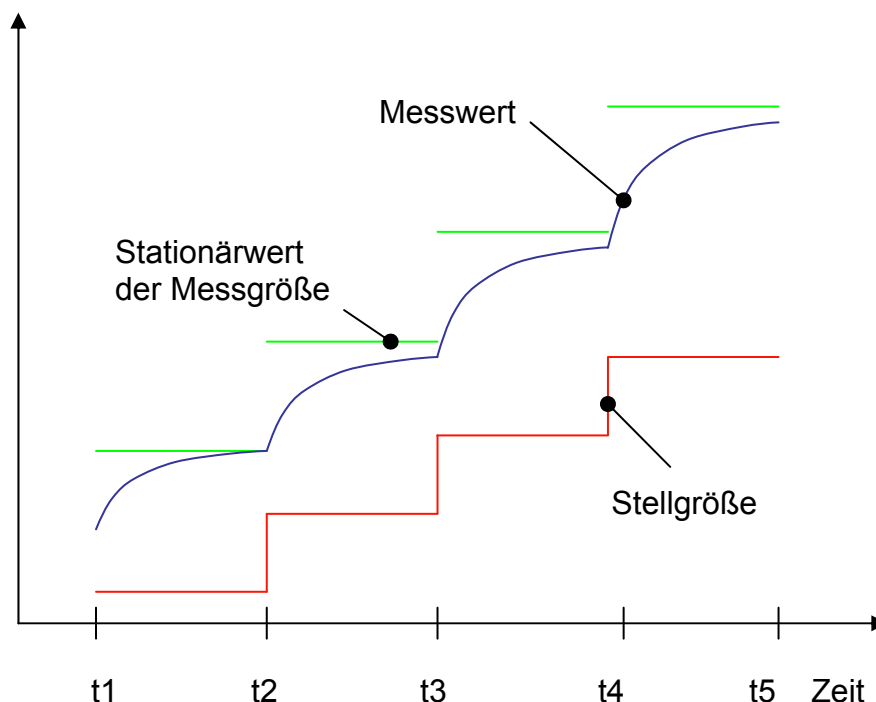


Abbildung 6.7: Schema einer konventionellen Motorvermessung

Die vorliegende Grafik (Abbildung 6.7) illustriert die Reaktion einer beliebigen Messgröße gegenüber einer Parameter- oder Laständerung (Sprung von Drehzahl, Einspritzmenge, ZZP o.ä.). Im Schnitt beträgt eine typische Stufendauer, d.h. die Zeitspanne zwischen zwei Parameteränderungen, ca. 2min. Bei größeren Motoren mit größerer thermischer Kapazität kann eine solche Stationärstufe auch 5min und länger andauern. In diesem Zusammenhang erhält die Beharrungsbeurteilung eine weitere wichtige Funktion.

Wenn es möglich ist, über einen noch zu definierenden Algorithmus die Stationarität eines Betriebspunktes reproduzierbar zu bestimmen, so könnte man damit auch die Stufendauer eines beliebigen Motors optimal einstellen. Zwei Fehlerfälle ließen sich damit vermeiden:

Bei zu kurzer Wartezeit nach Parameteränderung zeigen die Analysatoren noch nicht den Stationärwert. Es stellt sich unter Umständen ein großer dynamischer Fehler aufgrund des nicht berücksichtigten Übertragungsverhaltens ein. Der Grad der Stationarität hat in einem solchen Fall einen direkten Einfluss auf die Güte der nachfolgenden Modellbildung und Grundbedeutung der Motorsteuergeräte. Sind manche Messgrößen noch nicht in Beharrung, so werden Optima nicht exakt wiedergegeben, und jegliche Modellbildung wird von Grund auf fehlerhaft.

Im zweiten Fall wird zu lange gewartet, ehe mit der Messung begonnen wird. Die Messwerte sind längst stabil, es geht wertvolle Zeit verloren. Damit ist zwar die Güte der Messung unverändert gut, aber aus Kostensicht ist dieser Umstand unbedingt zu vermeiden.

Der Grad der Beharrung wird am Prüfstand bislang entweder durch den Prüfstandsfahrer oder durch ein zeitgesteuertes Verfahren überwacht. Da der Stationärwert zum Zeitpunkt der Messung noch nicht bekannt ist, wird stets die Änderung des Messwertes betrachtet, d.h. der Gradient, den der Messdatenverlauf beschreibt. Die rechnergestützte Beharrungserkennung verhilft dem Prüfstandsfahrer, und in einem nächsten Entwicklungsschritt der Prüfstandssteuerung, zu einem reproduzierbaren Stationaritätskriterium, das als weiterer Schritt in Richtung Qualitätssteigerung angesehen werden kann.

Die drei wesentlichen Ziele und Vorteile einer Beharrungserkennung lassen sich also wie folgt zusammenfassen:

- Einschaltkriterium für ausschließlich stationär gültige Methoden
- Qualitätssteigerung durch reproduzierbares Stabilitätskriterium
- Möglichkeit der Zeitersparnis durch frühzeitiges Erkennen von Stationarität

Das Verfahren muss einige Randbedingungen erfüllen, die für einen erfolgreichen Einsatz notwendig sind. Da im Vorfeld der Messung noch nichts über die genaue Lage und Art der verwendeten Sensoren bekannt ist, muss die Methodik der Beharrungserkennung sehr allgemeingültig und flexibel sein. Der Mechanismus muss bei Temperaturverläufen ebenso gut arbeiten wie bei Abgaswerten, Turboladerdrehzahlen oder Druckverläufen.

Gleichzeitig ist dafür Sorge zu tragen, dass die notwendige Rechenzeit nicht zu lang wird, da ja die eigentlichen Diagnoseoperationen ihrerseits einen umfangreichen Rechenaufwand darstellen. Hierzu wurden eine ganze Reihe von Ansätzen verfolgt

und an einer Vielzahl von Last- und Parameteränderungen getestet. Die verschiedenen Ansätze sollen im folgenden Kapitel erörtert werden.

6.2.2 Möglichkeiten der Beharrungsbeurteilung

Grundsätzlich kommen eine Reihe von Verfahren in Frage, mittels derer der Stationaritätsgrad ermittelt werden kann.

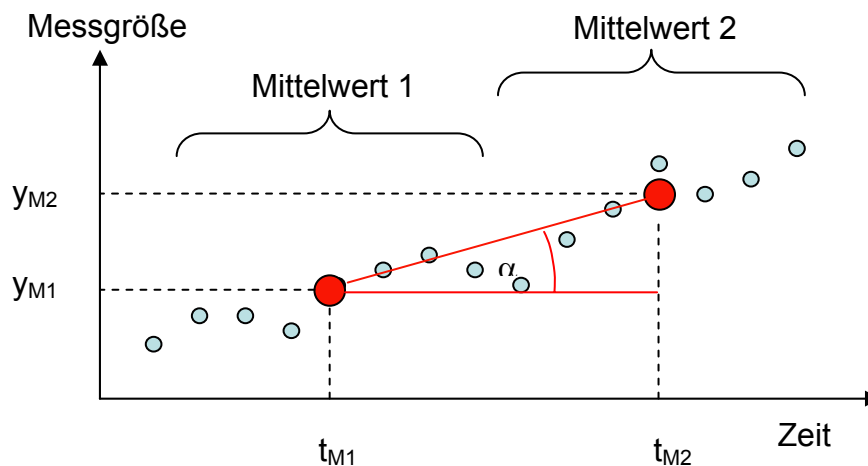


Abbildung 6.8: Methoden zur Steigungsermittlung1

Die Einfachste besteht im Vergleich von Mittelwerten, die aus zwei Gruppen von Messdaten gebildet werden. Die Änderung zwischen diesen Punkten kann sehr leicht in eine Geradensteigung a umgesetzt werden, die als direktes Maß von Stationarität dient.

$$a = \frac{y_{M2} - y_{M1}}{x_{M2} - x_{M1}} \quad [12]$$

Gleiches gilt für eine lineare Interpolation der letzten n Messwerte. Auch hier wird der Gradient unmittelbar aus der Geradengleichung abgelesen und mit einem Grenzwert abgeglichen. Die Berechnung kann sehr einfach nach Minimierung der quadratischen Abweichung von Modell zu Messdaten erfolgen.

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_r - y_i)^2 = \text{Min} \quad \text{mit} \quad y_r = ax + b \quad [13]$$

Die Steigung wird hier zu

$$a = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [14]$$

Beide Verfahren sind zwar leicht applizierbar und in Bezug auf die Rechnerbelastung sehr geeignet, weswegen sie auch teilweise verwendet werden, allerdings ist eine Aussage über den Gradienten nur für Werte möglich, die schon eine Weile in der Vergangenheit liegen. Über den aktuellen Wert kann keine Aussage getroffen werden.

Nun bietet sich natürlich die Möglichkeit, nur sehr kurze Zeitfenster von wenigen Sekunden zu betrachten, um dem aktuellen Gradienten sehr nahe zu kommen. Dies führt aber zu sehr unsicheren Aussagen, da das stets vorhandene Rauschen, kleine Oszillationen und schon die digitale Auflösung einen zu großen Stellenwert in der Gradientenberechnung einnehmen. Wie sich die Signalqualität auf die Stabilitätserkennung auswirkt, illustriert die folgende Grafik. Niederfrequente Schwingungen, beispielsweise aufgrund einer AGR- oder Ladedruckregelung, führen zu einem stetigen Wechsel zwischen detektierter Stabilität und Instabilität. Erst durch die Verlängerung des betrachteten Zeitbereiches kann ein brauchbarer Wert ermittelt werden.

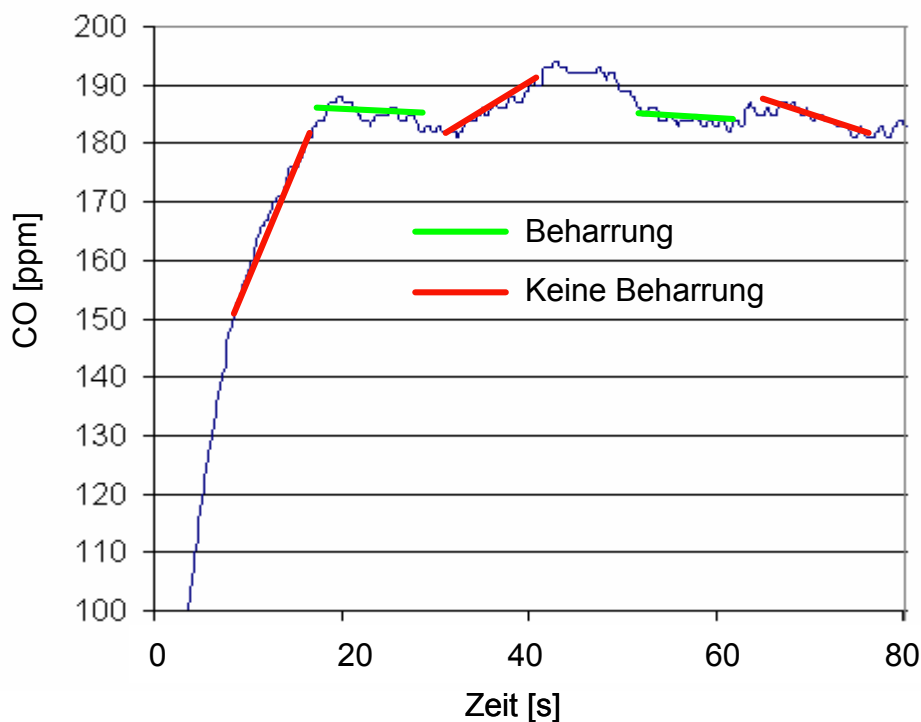


Abbildung 6.9: Problematik oszillierender Werte

Wie groß der Einfluss des betrachteten Zeitfensters auf die Güte der Beharrungsaussage ist, zeigt die folgende Grafik. Für verschiedene Messgrößen und Lastsprünge wurde die kürzestmögliche Zeitspanne ermittelt, für die eine brauchbare Aussage über den Beharrungszustand gewonnen werden kann. Die Zeitspanne muss so groß gewählt werden, dass Oszillationen auf dem Signal nicht mit abgebildet werden. Als Methode zur Gradientenbestimmung wurde in diesem Fall die Linearapproximation verwandt. Ein nahezu identisches Bild zeigt sich bei der Betrachtung zweier Mittelwerte.

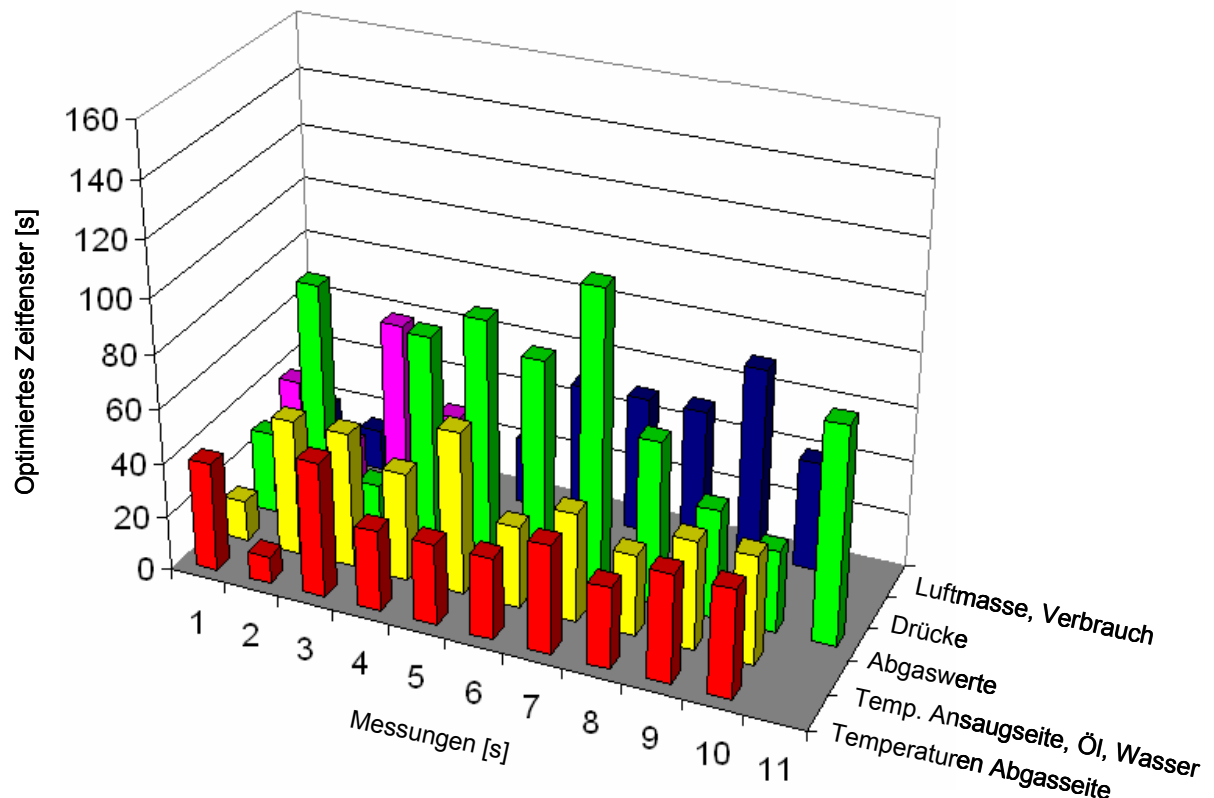


Abbildung 6.10: Optimierung des Datenbereichs zur Linearapproximation

Gerade die Abgasgrößen zeichnen sich durch sehr langsame Schwankungen auf dem Signal aus, so dass hier Zeitfenster von bis zu 100s Dauer berücksichtigt werden müssen, um eine stabile Aussage über den betreffenden Kanal zu erhalten. Im Schnitt kann nach 60s mit einer ersten verwertbaren Aussage über den Grad der Stationarität des Motors gerechnet werden. Mit diesem Wert ist eine Beharrungserkennung auf Basis der Mittelwerte oder der Linearapproximation prinzipiell möglich.

Bei einer zukünftig angestrebten Stufendauer von nicht mehr als 1.5 Minuten ist dieser Zeitverzug aber schon zu groß und nicht mehr akzeptabel.

Der Nachteil dieser Verfahren von Mittelwertbildung und Linearapproximation ist die Beeinflussbarkeit durch Schwankungen im Signal und der lange Zeitverzug bis zur ersten Aussage. Beides stellen Punkte dar, die einen Einsatz als nicht praktikabel erscheinen lassen.

Die genannten Probleme führen zur Beschreibung eines noch zu definierenden Verfahrens.

- Es sollen möglichst alle Daten ab Parameteränderung genutzt werden, um das globale Verhalten eines beliebigen Kanals analysieren zu können
- Es soll der Gradient am aktuellen Messpunkt bestimmbar sein
- Es soll nach kurzer Zeit bereits eine Vorhersage möglich sein
- Der Algorithmus muss schnell genug sein, um gleichzeitig eine Vielzahl von Kanälen im 1Hz-Takt analysieren zu können

Die Analyse dieser Anforderungen resultiert in einem Verfahren mit Systemidentifikation. Dies schließt ausdrücklich den steilen Messwertverlauf nach Parameteränderung mit ein, da er wesentliche Informationen zum Systemverhalten beinhaltet. Durch die Nutzung dieser Daten kann auch zu einem früheren Zeitpunkt eine Vorhersage über den Datenverlauf getroffen werden. Gleichzeitig wird die Aussage sicherer, da der gesamte Datenverlauf, und nicht nur ein kurzer Zeitabschnitt, mit in die Betrachtung eingeht.

Als offene Fragestellung bleibt die Art der Modellbildung, die im Folgenden geklärt wird.

6.2.3 Theoretische Betrachtung und Bestimmung des Übertragungsverhaltens

Grundsätzlich kann das Übertragungsverhalten des Systems Motor-Messgerät wie folgt dargestellt werden.

Eine Eingangsgröße U kann ein Zündzeitpunkt, eine Drehzahl, eine Einspritzmenge oder eine beliebige andere Eingangsgröße am Motor sein. Eine Veränderung einer solchen Größe bewirkt in den meisten Ausgangsgrößen wie Abgastemperatur, Abgasemission, Drehmoment etc. eine entsprechende Änderung gemäß des motorischen Übertragungsverhaltens G_s . Darauf schließt sich ein weiteres Übertragungsverhalten G_m des Messgerätes an.

Meist kommt es noch zusätzlich zu Wechselwirkungen zwischen den Ausgangsgrößen.

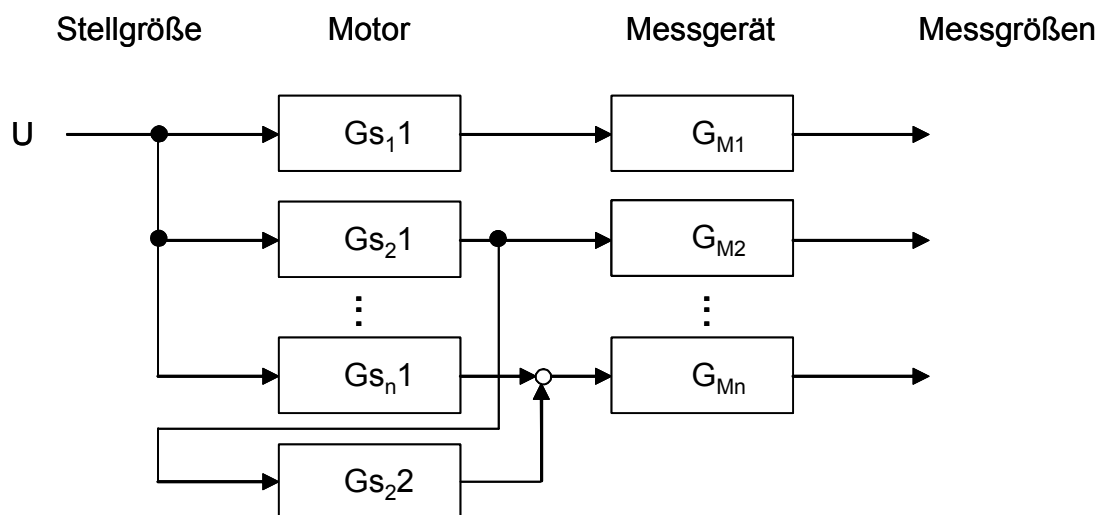


Abbildung 6.11: Blockschaltbild eines Prüfstandsaufbaues [8]

Zum Beispiel mag als Eingangsgröße die Einspritzmenge eines Dieselmotors dienen, deren Vergrößerung einen Anstieg der Abgastemperatur zur Folge hat. Die Bedingungen im Brennraum stellen sich sehr schnell ein, d.h. die Temperatur nimmt sehr schnell und deutlich zu.

Gleichzeitig erwärmen sich aber auch die Bauteile wie Brennraumwände, Krümmer und Turbinengehäuse, so dass der Wärmeübergang abnimmt und die Temperatur im Abgasstrang weiter ansteigt. Dieser Prozess ist deutlich langsamerer Natur, und kann sich über Minuten erstrecken. Es überlagern sich also verschiedene Prozesse mit unterschiedlichem Zeitverhalten.

Um eine möglichst einfache Systemidentifikation zu erhalten, können die in Reihe geschalteten Übertragungsfunktionen zusammengefasst werden, so dass eine Parallelschaltung von im einfachsten Fall zwei Übertragungsfunktionen übrig bleibt.

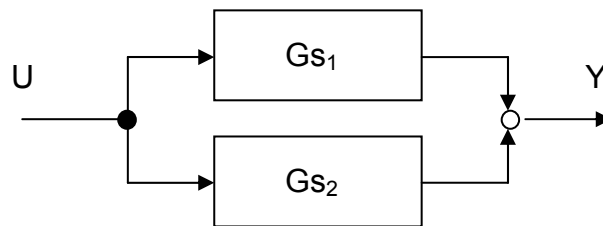


Abbildung 6.12: Ersatzmodell für einen Messkanal [8]

Die Approximierbarkeit einer solchen Funktion soll am Beispiel der Ladelufttemperatur dargestellt werden. Es kommt wiederum der einfachste Fall, nämlich die Parallelschaltung zweier PT1-Glieder zum Einsatz. Alternativ dazu wurden noch verschiedene weitere Modellübertragungsfunktionen untersucht, die bei unterschiedlichem Rechenaufwand ähnliche Lösungen erwarten lassen. (PT1, PT2) Polynommodelle und vorherige Filterung der Daten konnten in einem frühen Zeitpunkt als nicht vorteilhaft aussortiert werden.

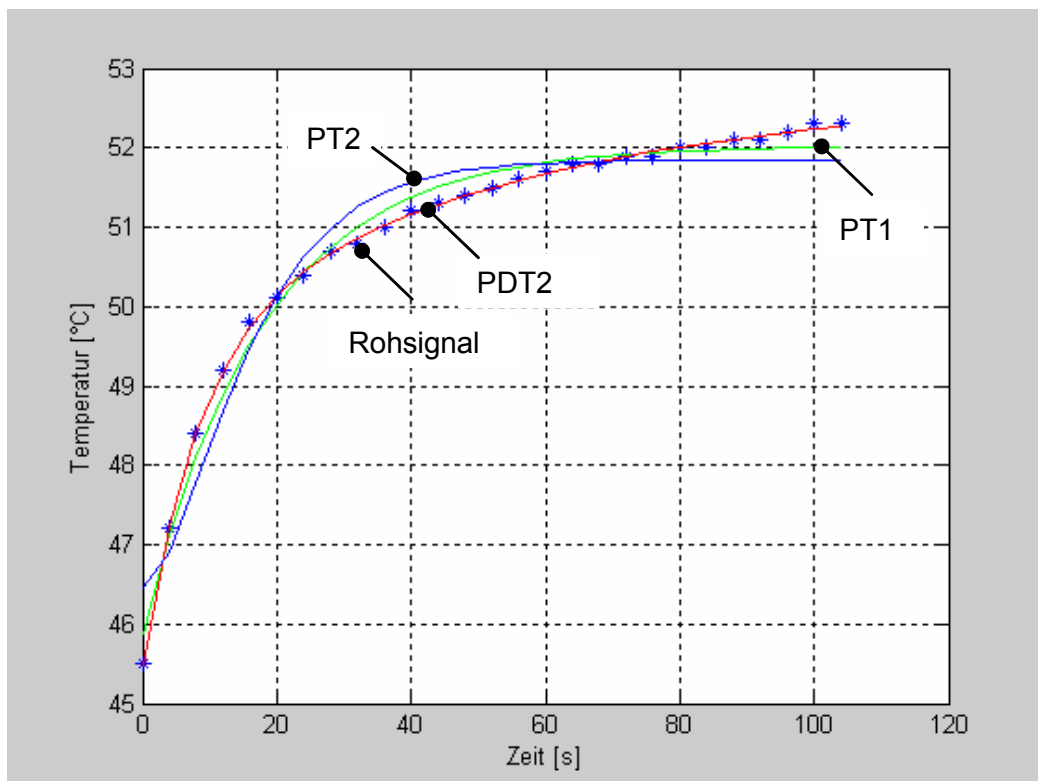


Abbildung 6.13: Güte der Modellbildung I

Die Gleichungen der Ansätze im Zeitbereich sind:

$$\text{PDT2:} \quad Xa(t) = K_1(1 - e^{\frac{-t}{T_1}}) + K_2(1 - e^{\frac{-t}{T_2}}) + Xa0 \quad [15]$$

$$\text{PT2:} \quad Xa(t) = K \cdot \left(1 - \frac{e^{-D\omega t}}{\sqrt{1-D^2}} \cdot \cos(\omega \cdot \sqrt{1-D^2} \cdot t - \arcsin D) \right) + Xa0 \quad [16]$$

$$\text{PT1:} \quad Xa(t) = K \cdot (1 - e^{\frac{-t}{T}}) + Xa0 \quad [17]$$

In Abbildung 6.13 ist deutlich sichtbar, dass der Ansatz als PDT2 trotz der sehr vereinfachten Herleitung die besten Resultate liefert. Die gute Beschreibung der Messdaten kann für beliebige Temperaturen gezeigt werden. Gerade diese sind sehr gute Indikatoren für Stabilität und Beharrung des Motors.

Aber auch schnellere Messtechnik mit ausgeprägtem Rauschen kann mit diesem PDT2-Glied beschrieben werden. Der Unterschied zur deutlich einfacher rechenbaren PT1 Approximation oder zum PT2-Ansatz tritt dabei aber nicht mehr so deutlich zu Tage. Als Beispiel hierfür ist die Reaktion der Turboladerdrehzahl auf einen Lastsprung dargestellt.

Gut zu erkennen ist die große Streuung des Signals, die unter anderem auch auf große Drehzahlschwankungen innerhalb eines Arbeitsspieles zurückgeht. Die Modellbildung ermöglicht aber auch hier die Entscheidung, ob der Kanal einen nennenswerten Gradienten beschreibt oder nicht.

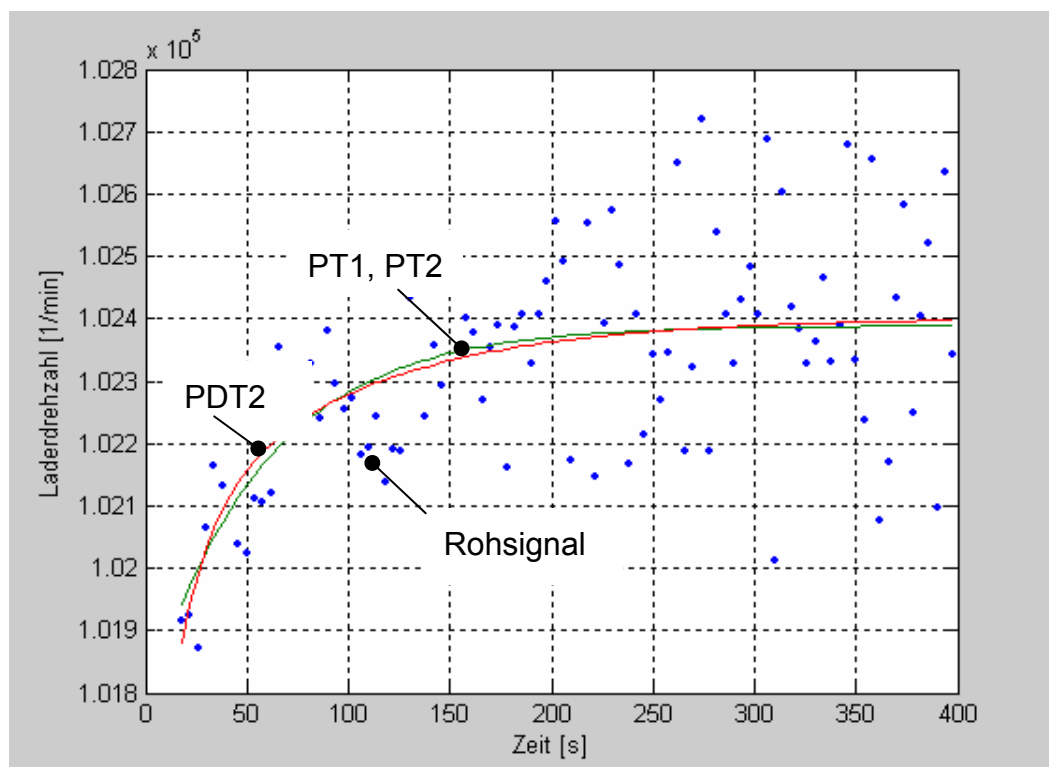


Abbildung 6.14: Güte der Modellbildung II

Die PT2 Approximation, die für manche Daten aufgrund der Modellierbarkeit von Oszillationen bessere Ergebnisse liefert, liegt in diesem Beispiel nahezu deckungsgleich auf dem PT1-Ansatz. Wichtig ist aber auch hier, dass mit einem Ansatz alle Kanäle gleichwertig gut beschrieben werden müssen, um Eingabefehler und Parametrierungsaufwände zu vermeiden. Da die allgemeine Verwendbarkeit für alle drei Ansätze besteht, soll auch noch der Rechenaufwand mit zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Die Bestimmung der Modellparameter ist im Gegensatz zu Linearapproximation oder Mittelwertansätzen nicht mehr analytisch lösbar, da es sich um nichtlineare Gleichungen mit verschiedenen Variablen im Exponenten handelt.

Mittels eines Gradientenverfahrens ist es aber für die PT1- und PDT2-Approximation möglich, online die Funktion der quadratischen Abweichung zwischen Messdaten und Zielfunktion zu minimieren, so dass die Modellparameter in nahezu Echtzeit vorliegen.

Es kann ein sehr einfaches Verfahren zum Einsatz kommen, da die Fehlerfunktion (mittleres Fehlerquadrat) keinerlei lokale Minima aufweist. Die Fehlerfunktion der folgenden Grafik entspricht dem bereits dargestellten Temperaturverlauf der Ladeluft. Es ist zu erkennen, dass das Minimum in der Kombination aus einer schnellen und einer langsamen Zeitkonstante zu finden ist. Natürlich können die Variablen spiegelbildlich verwendet werden, weswegen es hier zur Ausprägung zweier Minima kommt. Die Fehlerfunktion für das PT1-Modell entspricht einem Schnitt den Kennfeldes bei $1/T_2=0$, ist also nur zweidimensional.

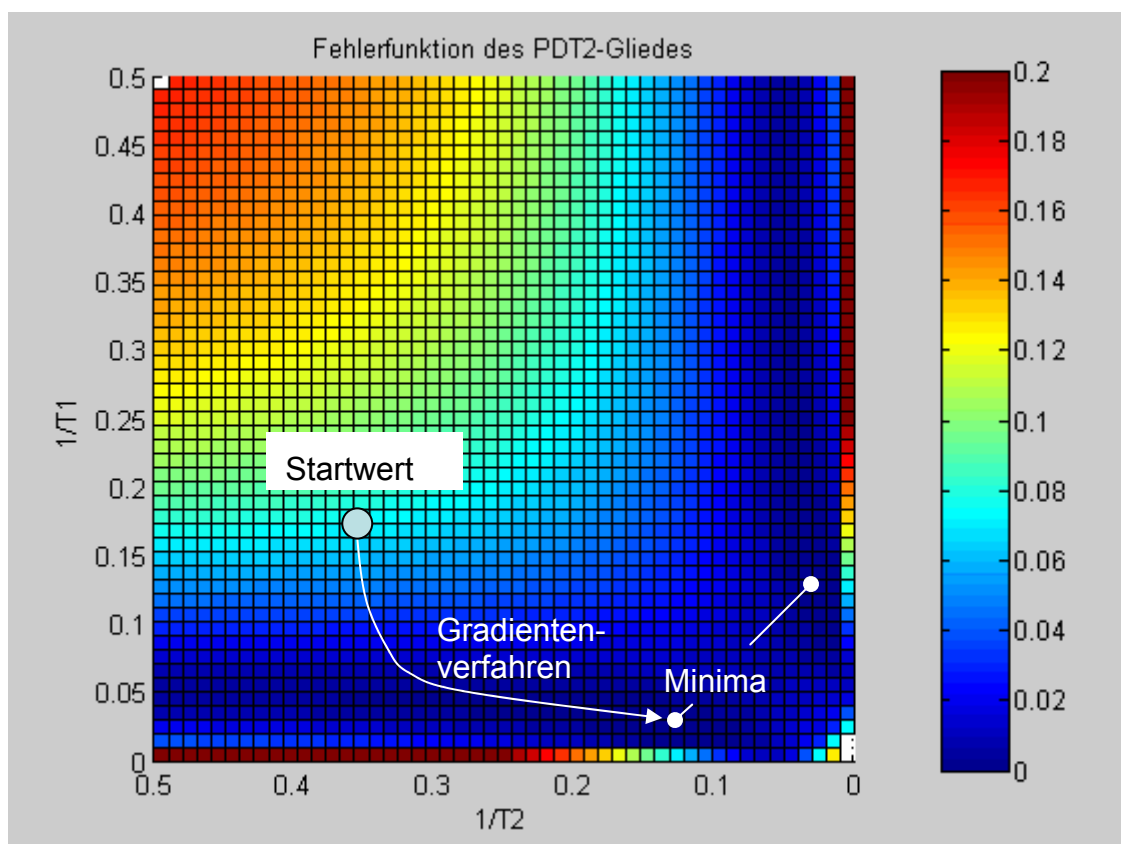


Abbildung 6.15: Fehlerfunktion des PDT2-Gliedes

Für den PT2-Ansatz ergibt sich für denselben Temperatursprung ein ganz anderes Bild. Die Fehlerfunktion, also die quadratische Abweichung von Modell zu den Messdaten, zeigt viele lokale Minima. Damit ist es ein deutlich größerer mathematischer Aufwand, auf die korrekten Modellparameter ω und D zu schließen.

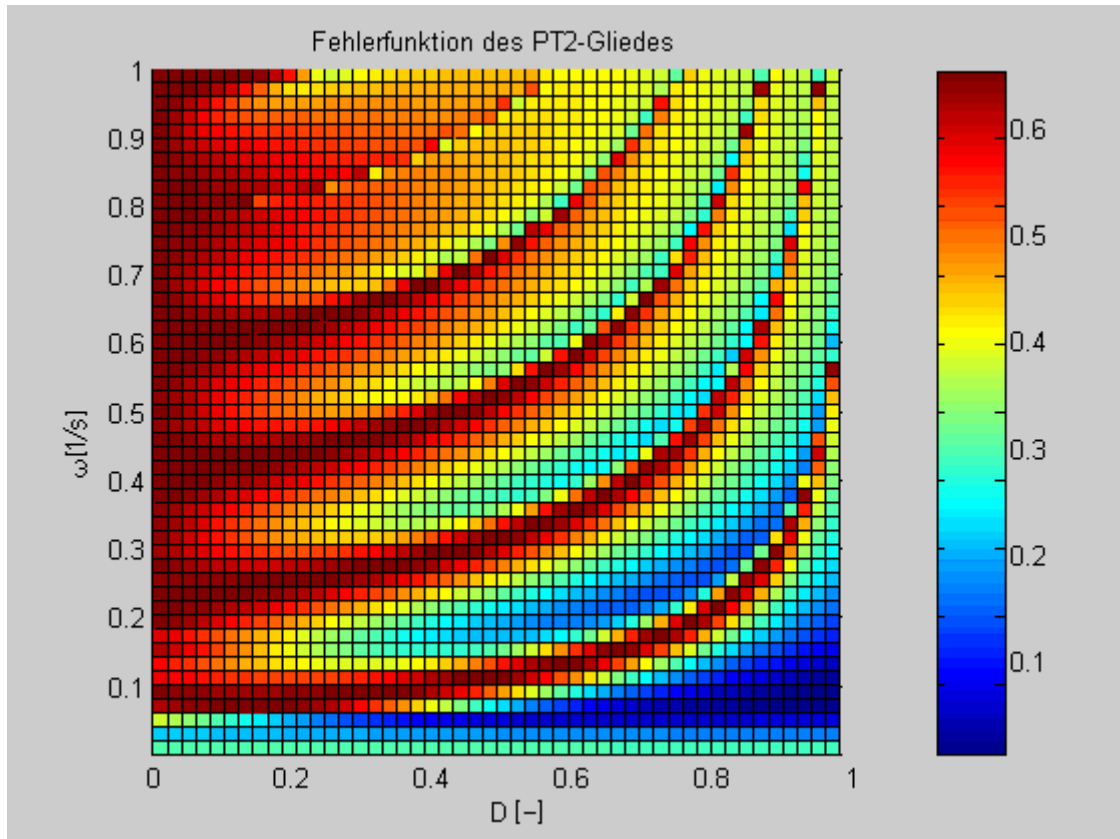


Abbildung 6.16: Fehlerfunktion des PT2-Gliedes

Der PDT2-Ansatz stellt nach Abwägung den besten Kompromiss dar bezüglich Rechenzeit und Modellgüte.

Wenn die Modellparameter vorliegen, kann die Stabilität des aktuellen Punktes beurteilt werden. Der Gradient ergibt sich mittels

$$\dot{X}a(t) = \frac{K_1}{T_1} e^{\frac{-t}{T_1}} + \frac{K_2}{T_2} e^{\frac{-t}{T_2}} \quad [18]$$

Für die Schlüsselgrößen Abgastemperatur, Temperatur nach Ladeluftkühler, Öl- und Wassertemperatur als auch Ladedruck wird der Gradient stetig berechnet. Bei Unterschreitung eines definierten Wertes werden diese Kanäle dann als stabil bezeichnet. Wenn alle Schlüsselgrößen stabil sind, erfolgt die Freischaltung der nur stationär gültigen Methoden. Die Beharrungserkennung bleibt danach noch zur Beurteilung der Messwertstabilität aktiv.

6.3 Fehlerdetektion (FD Fault detection)

Die Fehlerdetektion beinhaltet alles, was zum Aufspüren von Unstimmigkeiten innerhalb der Messdaten beiträgt. Dies beinhaltet noch nicht die Überlegung, welche Ursache diese Unstimmigkeiten hervorgerufen haben.

Das Aufspüren selbst gelingt durch die Beobachtung aller oder eines Teils der Prozessgrößen. Je nach Kombination der Ein- und Ausgangsgrößen und der Strategie der Prüfung lassen sich folgende Untergruppen definieren [20]:

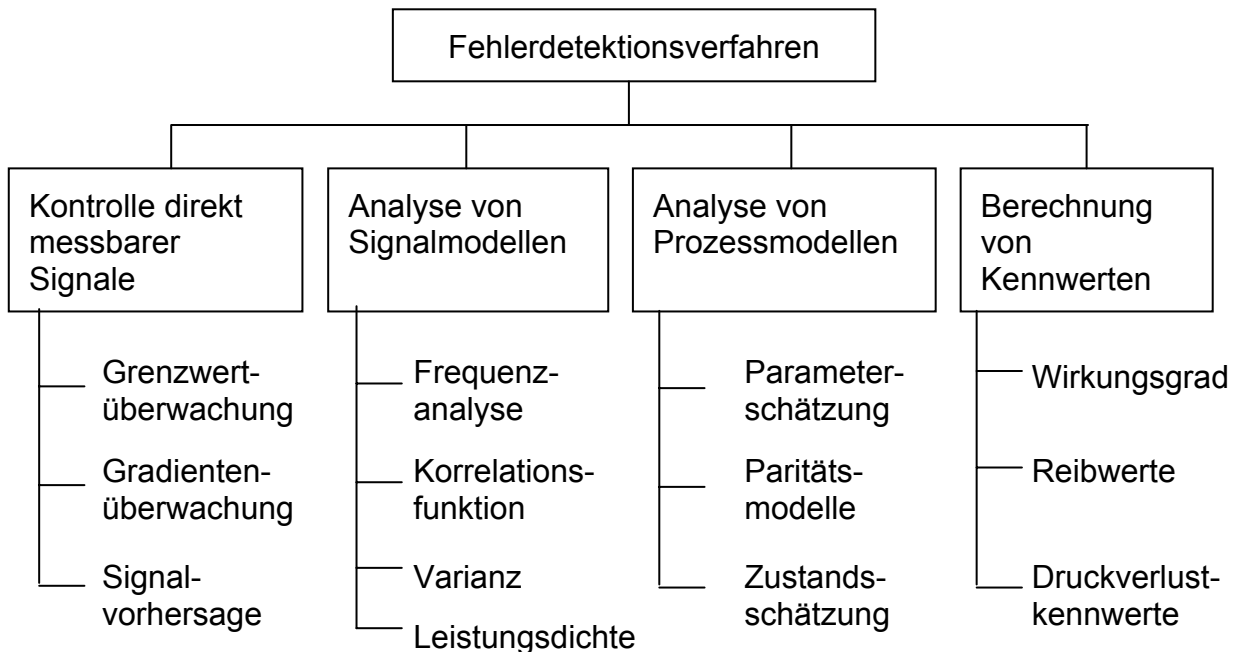


Abbildung 6.17: Fehlerdetektionsverfahren

Im Folgenden sollen einige Beispiele zu den genannten Punkten dargelegt werden, bevor dann exemplarisch einige Modelle aus der erarbeiteten Software vorgestellt werden.

Kontrolle direkt messbarer Signale:

Diese Untergruppe bildet einen wesentlichen Baustein zur Detektion von Sensorausfällen. Je nach Motortyp sind für die gängigen Kanäle Grenzwerte definiert, die auch im transienten Betrieb nicht über- oder unterschritten werden dürfen. Aufgrund der breiten Variabilität der Verbrennungsmotoren sind diese Grenzwerte natürlich sehr großzügig angelegt, weswegen tatsächlich nur Ausfälle detektiert werden können. Eine schlechte Kalibrierung einer Messgröße kann damit nur selten erkannt werden.

Auf eine Gradientenüberwachung oder eine Signalvorhersage mittels polynominaler Ansätze wird an dieser Stelle verzichtet, da über das System Motor-Bremse und auch die Zielsetzung der Vermessung zu wenige Informationen vorliegen.

Analyse von Signalmodellen:

Die Analyse der Einzelsignale kann je nach Messort eine sehr interessante Informationsquelle zum Zustand entweder des Motors oder des Sensors sein. So können mittels Fouriertransformation die Frequenzen des Motors und z.B. störender Netzfrequenz selektiert und bewertet werden. Selbst eine Störung eines Einzelzylinders kann durch die Signalanalyse der Abgasdruckpulsationen oder des Lambdasignals detektiert werden. Die entsprechenden Fehlerfälle lassen sich dann anhand der Ausprägung der Amplituden in den verschiedenen höheren Ordnungen der Motorgrundfrequenz analysieren.

Im breiten Industrieinsatz ist es allerdings noch keine Selbstverständlichkeit, eine Vielzahl von Signalen mit mehr als 1 Kiloherz aufzuzeichnen. Die mittlere Aufzeichnungsrate beträgt in den meisten Anwendungen 0.1 bis 10 Herz. Die nachfolgende notwendige Filterung der Signale vermeidet damit auch einen tieferen Blick in die hochfrequenten Informationsquellen. Aus diesem Grunde wurde im vorliegenden Projekt auf eine ausführliche statistische Beurteilung verzichtet.

Analyse von Prozessmodellen:

Gegenüber den bislang beschriebenen Modellen liefern Prozessmodelle zum ersten Mal eine analytische Redundanz verschiedener Werte. Es können also direkt Mess- und Rechengrößen miteinander verglichen werden, was die Fehlerempfindlichkeit gegenüber der Grenzwertbetrachtung deutlich anhebt.

Prozessmodelle sind in diesem Fall Berechnungsvorschriften, die eine Ausgangsgröße aus verschiedenen Eingangsgrößen bestimmen.

Der Funktionstyp ganz allgemein lautet

$$Y=f(X,P,F)$$

[19]

wobei X die Gruppe der Eingangsgrößen, P ein oder mehrere Modellparameter und F eine beliebige Störgröße oder Sensorfehler darstellt.

Parameterschätzverfahren zielen darauf ab, ein bestimmtes Modell in seinem zeitlichen Verhalten zu analysieren, um daraus auf die Modellparameter wie Steifigkeiten, Volumina, Widerstände etc. schließen zu können. Eine Veränderung dieser Parameter stellt unter Umständen dann schon einen Fehler dar. Problematisch sind diese Verfahren, da die meisten Fehler schon mit dem ersten Messpunkt eintreffen. Das heißt, das Modell lernt diesen Fehler als richtig kennen, und legt z.B. ein 3fach zu hohes Saugrohrvolumen als Basisparameter ab. Dieser Fehler wird dann eventuell nur gefunden, wenn eine Eingangsgröße zufällig repariert wird, und nun die Parameter nicht mehr übereinstimmen.

Besser geeignet sind Modelle, in denen die Modellparameter schon von Beginn an vorliegen. Diese werden als Paritätsmodelle bezeichnet. Bei diesen kann aus den Residuen, d.h. den Differenzwerten zwischen Modell und Messung, auf fehlerhafte Eingangsgrößen geschlossen werden.

Beschränkt auf Modelle in Stationärpunkten erfolgen in der erarbeiteten Software eine ganze Reihe von physikalisch basierten Rechnungen, die insbesondere im

Bereich der Abgaszusammensetzung, der Luftmasse und des Kraftstoffverbrauchs sehr genaue Resultate liefern. Aus schon genannten Gründen musste allerdings auf eine Modellierung der Instationäranteile in den meisten Fällen verzichtet werden.

Neben der Einzelkanalanalyse mittels Signalmodell oder Grenzwertkontrolle und der Bildung von Prozessmodellen ist als vierte Möglichkeit die Berechnung von Kenngrößen auch ohne genaue Kenntnis von Motor und Belastungseinheit möglich. Diese Kenngrößen liefern sowohl wertvolle Informationen über die Güte des Verbrennungsprozesses als auch über den Zustand verschiedener Motor-Teilsysteme wie Verdichter, Ladeluftkühler oder Turbine.

Die verwendeten Motorteilmodelle lassen sich weiter unterteilen:

- direkte Vergleiche zwischen Messgrößen
- empirische, messdatenbasierte Polynommodelle oder neuronale Netze
- physikalisch basierte Bilanzgleichungen (Masse und Energie)
- physikalisch basierte ideale Vergleichsprozesse

Insgesamt wurden von den oben angesprochenen Gruppen 83 Vergleiche oder Teilmodelle umgesetzt. Beispielhaft sollen im Folgenden drei verschiedene Modelle mit ganz unterschiedlichen Modellstrukturen vorgestellt werden.

6.3.1 Kohlenstoffbilanz

Die Kohlenstoffbilanz gibt an, wie viel Kohlenstoff über die Systemgrenze dem Motor zugeführt wird, und wie viel der Motor davon wieder abgibt. Auf der folgenden Grafik sind die entsprechenden Kohlenstoffpfade vereinfacht aufgezeigt. Über die Luft wird ein kleiner Anteil Kohlenstoff aufgrund des natürlich vorliegenden CO_2 -Gehalts zugeführt. Der gerade im Hochlastbereich wesentliche Anteil kommt allerdings aus dem Kraftstoff. Abgeführt wird Kohlenstoff über verschiedene gasförmige Komponenten im Abgas. Das Motoröl stellt einen Kohlenstoffspeicher dar.

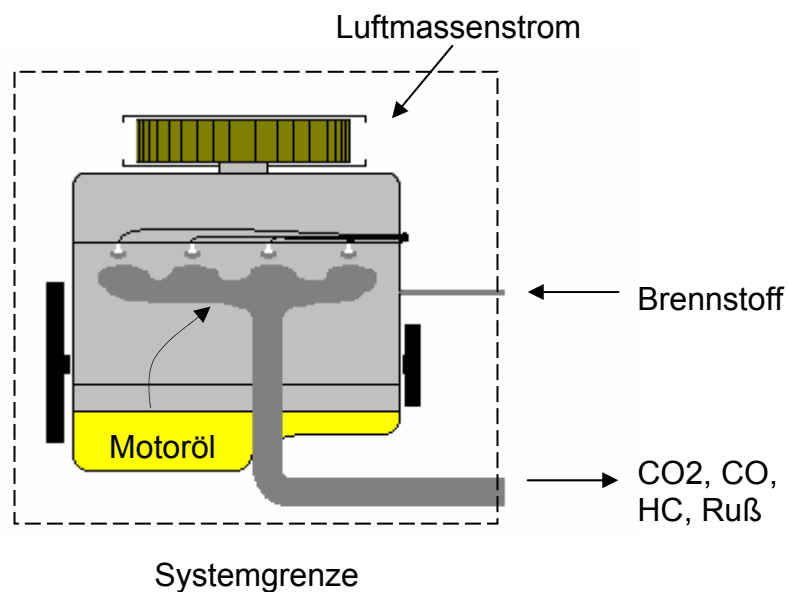


Abbildung 6.18: Kohlenstoffpfade am Verbrennungsmotor

Die Anteile aus Luft und Kraftstoff können direkt aus entsprechenden Messgrößen abgeleitet werden. Die Messwerte der Abgasmessanlage stellen allerdings nicht die wahren Konzentrationen im Abgasrohr des Motors dar, sondern das Abgas hat auf dem Weg zum Analysator einen Gaskühler passiert, in dem das bei der Verbrennung entstandene Wasser auskondensiert wurde. Dies geschieht allerdings nicht bei allen Abgaskomponenten, da manche auch direkt aus dem Rohabgas heraus analysiert werden können (HC, NO_x).

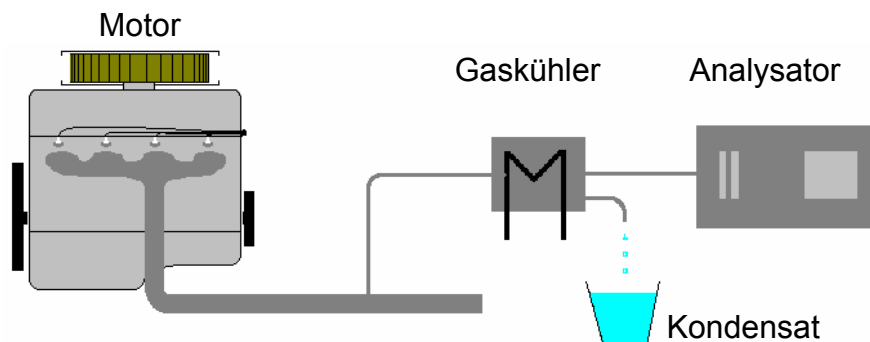


Abbildung 6.19: Prinzipbild Abgasanalyse

Es ist folglich zunächst eine Umrechnung der trocken gemessenen Abgasgrößen in die tatsächlich vorhandenen Rohabgaswerte notwendig.

Für diese Umrechnung existieren zwar fertige Formeln aus der Abgasgesetzgebung, jedoch sind diese Formeln stets Zahlenwertgleichungen mit einigen physikalisch basierten Zusatztermen, die aber nicht auf alternative Kraftstoffsorten oder besondere Verbrennungsbedingungen ausgelegt sind (Biodiesel, GTL, Optimax oder unvollständige Verbrennung bei $\lambda < 1$).

Da es hier um das Aufspüren kleiner Fehlkalibrierungen geht, können diese Vernachlässigungen nicht akzeptiert werden. Es wurde daher eine den Anforderungen entsprechende Feuchtekorrektur mit den Eingangsgrößen λ , Kraftstoffzusammensetzung und Abgaswerte zusammengestellt.

6.3.1.1 Allgemein gültige Feuchtekorrektur

Grundsätzlich müssen die Gasmassen abgesehen vom Wasserdampf sowohl vor als auch nach dem Kühler erhalten bleiben.

Die Messwerte der Gasanalysatoren stellen Raumanteile dar, die über folgenden Zusammenhang und der Kenntnis der Molmassen in Gewichtsanteile umgeformt werden können.

$$g_i = r_i \cdot \frac{M_i}{M_{\text{Gemisch}}} \quad [20]$$

Der Gewichtsanteil multipliziert mit dem Gesamtmassenstrom stellt den Massenstrom einer Gaskomponente dar, welcher nach der Massenerhaltung über den Gaskühler konstant bleiben muss (Annahme: Es geht kein Gas in das Kondensat über).

$$r_{i_trocken} \cdot \frac{M_{\text{Komponente_i}}}{M_{\text{Abgas_trocken}}} \cdot \dot{m}_{\text{Abgas_trocken}} = r_{i_feucht} \cdot \frac{M_{\text{Komponente_i}}}{M_{\text{Abgas_feucht}}} \cdot \dot{m}_{\text{Abgas_feucht}} \quad [21]$$

Grundsätzlich gilt im Folgenden für die Umrechnung von trocken erzeugten Messwerten auf feuchtes Rohabgas die folgende Umformung mit dem Korrekturfaktor KF:

$$r_{i_feucht} = r_{i_trocken} \cdot KF \quad [22]$$

mit

$$KF = \frac{M_{\text{Abgas_feucht}}}{M_{\text{Abgas_trocken}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Abgas_trocken}}}{\dot{m}_{\text{Abgas_feucht}}} \quad [23]$$

Um die vier unbekannten Größen der Molmassen und Gasmassen vor und nach Kühler bestimmen zu können, wird folgender Ansatz gewählt.

Unter der Voraussetzung, dass die gesamte Abgasmasse in einem Kühler getrocknet wird, lässt sich zumindest die feuchte Abgasmasse direkt angeben. Später wird klar werden, dass auch jeder Teilstrom dieselben Gleichungen erfüllt.

Die feuchte Abgasmasse ist die Summe aller zugeführten Massenströme.

$$\dot{m}_{\text{Abgas}_{\text{feucht}}} = \dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}} \quad [24]$$

Für die trockene Abgasmasse müssen jetzt zunächst Annahmen gemacht werden, wie viel Wasser bei der Verbrennung entstanden ist. Eine Wasserstoffbilanz gibt Aufschluss darüber.

Wasserstoff wird zugeführt über den im Kraftstoff vorliegenden Anteil, abgeführt wird Wasserstoff im Wasser selbst, in molekularer Form, als auch in Kohlenwasserstoffen. Im Falle der Kohlenwasserstoffe wird sehr häufig die Ersatzgröße C_3H_8 (Propan) verwendet, da damit auch meist die Kohlenwasserstoffanalysatoren kalibriert werden. Der Wasserstoffanteil aus der Luftfeuchte wird an dieser Stelle vernachlässigt.

$$\dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot h_{\text{Brennstoff}} = (\dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}}) \cdot (H_2O + H_2 + 4 \cdot HC) \cdot \frac{M_{H_2}}{M_{\text{Abgas}_{\text{feucht}}}} \quad [25]$$

Um von der Massenmessung unabhängig zu werden, lässt sich die Gleichung unter Zuhilfenahme des stöchiometrischen Luftbedarfs umschreiben und nach der Molmasse auflösen.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{\text{Luft}}}{L_{\text{Stö}} \cdot \dot{m}_{\text{Brennstoff}}} \quad [26]$$

$$M_{\text{Abgas}_{\text{feucht}}} = \frac{(\lambda * L_{\text{Stö}} + 1)}{h_{\text{Brennstoff}}} \cdot M_{H_2} (H_2O + H_2 + 4 \cdot HC) \quad [27]$$

Der Anteil des freien Wasserstoffs lässt sich mittels des chemischen Gleichgewichts der Wassergasreaktion bestimmen. Kohlendioxyd (CO_2) und Wasserstoff (H_2) reagieren hierbei wechselseitig zu Kohlenmonoxyd (CO) und Wasser (H_2O). Gerade bei hohen Temperaturen und unterstöchiometrischem Motorbetrieb ist dieser Zusammenhang nicht mehr zu vernachlässigen.



Zu dieser Reaktion lässt sich eine Gleichgewichtskonstante definieren, die für Ottomotoren bei $\lambda < 1$ Werte um 3.5 annimmt [27]. Darüber hinaus spielt diese Reaktion kaum noch eine Rolle. Auch für Dieselmotoren mit λ -Werten > 1 kann dieselbe Rechnung verwandt werden. Die Einflussnahme nimmt dabei aufgrund der sehr geringen CO-Werte stark ab, es entsteht also dadurch kein nennenswerter Rechenfehler.

$$K = 3.5 = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \quad [29]$$

Die Molmasse des feuchten Abgases lässt sich bislang wie folgt darstellen:

$$M_{\text{Abgas}_{\text{feucht}}} = \frac{\lambda \cdot L_{\text{Stö}} + 1}{h_{\text{Brennstoff}}} \cdot M_{H_2} \left(H_2O \cdot \left(1 + \frac{CO}{3.5 \cdot CO_2} \right) + 4 \cdot HC \right) \quad [30]$$

Gleichzeitig gilt:

$$M_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot M_i \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1 \quad [31]$$

womit sich eine zweite Gleichung mit den Unbekannten H_2O und der Molmasse des feuchten Abgases bestimmen lässt.

$$M_{\text{Abgas}_{\text{feucht}}} = O_2(M_{O_2} - M_{N_2}) + CO_2(M_{CO_2} - M_{N_2}) + NO(M_{NO} - M_{N_2}) + HC(M_{HC} - M_{N_2}) + CO(M_{CO} - M_{N_2}) + H_2O(M_{H_2O} - M_{N_2}) + H_2(M_{H_2} - M_{N_2}) + M_{N_2} \quad [32]$$

Wird auch hier der Wasserstoffgehalt durch die Zusammenhänge der Wassergasreaktion ersetzt, und die Molmassen dann gleichgesetzt, so kann der Wasserdampfgehalt im Rohabgas angegeben werden. Zwecks Übersichtlichkeit werden einige der Molmassendifferenzen schon als Zahlenwerte dargestellt

$$H_2O = \frac{4 \cdot O_2 + 16 \cdot CO_2 + 2 \cdot NO + 16 \cdot HC + M_{N_2} - \frac{\lambda \cdot L_{\text{Stö}} + 1}{h_{\text{Brennstoff}}} M_{H_2} \cdot 4 \cdot HC}{\frac{\lambda \cdot L_{\text{Stö}} + 1}{h_{\text{Brennstoff}}} M_{H_2} \cdot \left(1 + \frac{CO}{3.5 \cdot CO_2} \right) - (M_{H_2O} - M_{N_2} + \frac{CO}{3.5 \cdot CO_2} \cdot (M_{H_2} - M_{N_2}))} \quad [33]$$

Aus Formel 29 und 33 folgt:

$$H_2 = \frac{CO \cdot H_2O}{3.5 \cdot CO_2} \quad [34]$$

Analog zu Gleichung 32 folgt mit Gleichung 34:

$$M_{\text{Abgas_trocken}} = O_2 \cdot (M_{O_2} - M_{N_2}) + CO \cdot (M_{CO_2} - M_{N_2}) + NO \cdot (M_{NO} - M_{N_2}) \dots \\ + HC \cdot (M_{HC} - M_{N_2}) + CO \cdot (M_{CO} - M_{N_2}) + H_2 \cdot (M_{H_2} - M_{N_2}) + M_{N_2} \quad [35]$$

Auch die Eingangsgrößen zur Berechnung des getrockneten Abgasmassenstromes sind jetzt bestimmt.

$$\dot{m}_{\text{Abgas_trocken}} = (\dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}}) \cdot \left(1 - H_2O \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{Abgas_feucht}}}\right) \quad [36]$$

Durch diese Darstellung wird auch die Unabhängigkeit der Feuchtekorrektur vom Abgasmassenstrom deutlich. Werden die vier Unbekannten in die Formel des Korrekturwertes eingesetzt, so kürzen sich die Abgasmassenströme heraus. Als einzige weitere Unbekannte verbleibt Lambda, das aber ohne Probleme aus den Abgasgrößen bestimmt werden kann [4].

$$KF = \frac{M_{\text{Abgas_feucht}}}{M_{\text{Abgas_trocken}}} \cdot \left[1 - H_2O \cdot \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{\text{Abgas_feucht}}}\right)\right] \quad [37]$$

Die gezeigte Herleitung verwendet die gemessenen Abgaskonzentrationen für die Berechnung der trockenen als auch der feuchten Molmassen. Die Molmasse des trockenen Abgases bedarf allerdings zu ihrer Berechnung trockene Abgaswerte, die Molmasse des feuchten Abgases natürlich auch Werte des feuchten Abgases.

Hierzu ist ein iterativer Rechenschritt notwendig. Mit dem berechneten Korrekturwert wird eine vorläufige Feuchtekorrektur durchgeführt, so dass alle Konzentrationen sowohl feucht als auch trocken vorliegen. In einem zweiten Schritt kann dann ein neuer genauerer Korrekturwert angegeben werden. Eine weitere Iteration ist dann in der Ergebnisqualität schon nicht mehr sichtbar. Die hergeleitete Version soll abschließend mit zwei weiteren Verfahren verglichen werden, um einen Eindruck über die daraus resultierenden Abweichungen möglich zu machen, dem letztlich Grund für eine eigene Berechnungsweise.

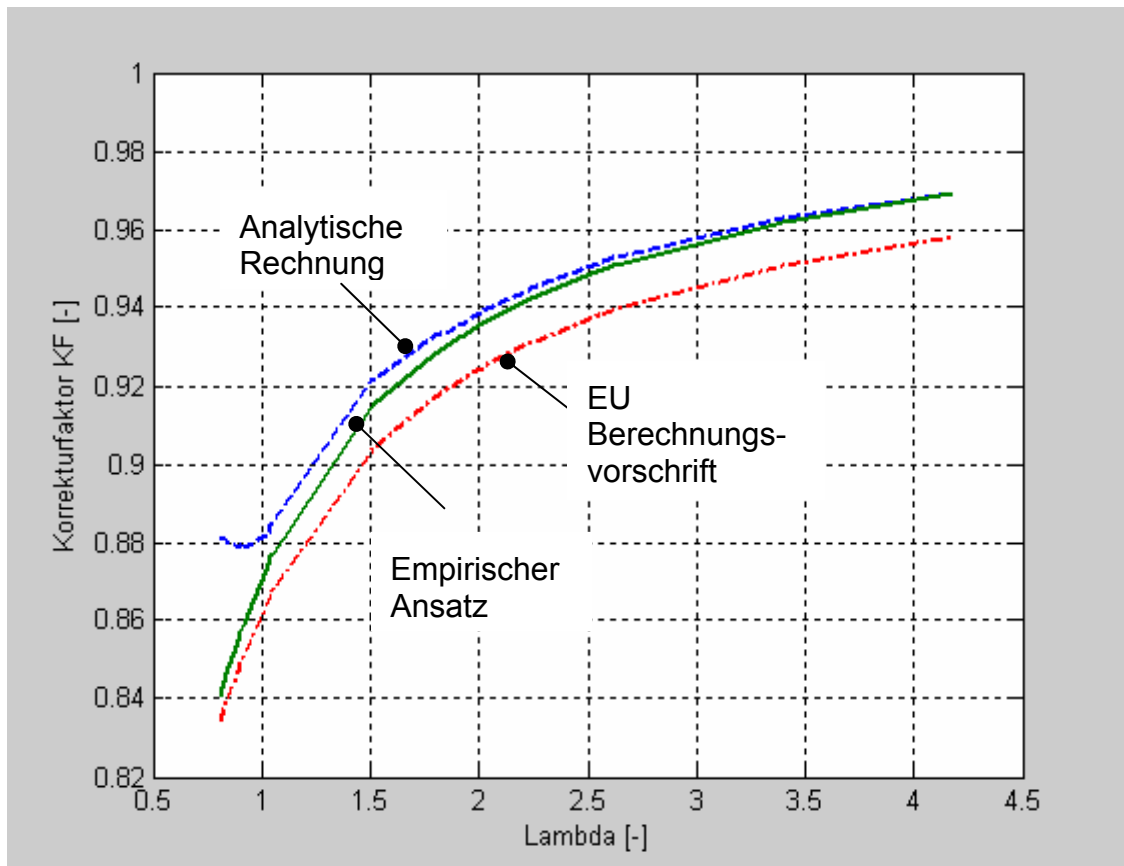


Abbildung 6.20: Verschiedene Feuchtekorrekturansätze

Sowohl der empirische Ansatz [12] als auch die Korrekturformel nach der EU-Berechnungsvorschrift [33] sind Zahlenwertgleichungen, in die weder die unvollständige Verbrennung noch die Kraftstoffzusammensetzung eingeht (Anhang 10.1). Die Einflüsse der unvollständigen Verbrennung machen sich am deutlichsten in der Genauigkeit der Kohlenstoffbilanz bemerkbar.

6.3.1.2 Modellbildung

Nachdem jetzt die unmittelbar an den Systemgrenzen vorliegenden Größen berechnet wurden (Luft- und Kraftstoffmassenmessung bedürfen keinerlei Korrekturen), kann die Bilanz über den Gesamtmotor aufgestellt werden.

Die in den Motor eingebrachten Kohlenstoffmassen unterteilen sich in die Anteile aus der Luft, dem Öl und dem Kraftstoff.

Luft:

Kohlenstoff wird in der Luft durch das vorhandene CO₂ transportiert.

$$C_{\text{Luft}} = g_{\text{CO}_2 \text{ Luft}} \cdot \frac{M_c}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} \quad [38]$$

Im Teillastbereich von Dieselmotoren kann dieser Anteil einige Prozent vom Kraftstoff-Kohlenstoffanteil ausmachen, weswegen eine Vernachlässigung für die geforderte Genauigkeit unzulässig ist.

Kraftstoff:

Bis zu 89% des Kraftstoffgewichts sind auf den Kohlenstoff zurückzuführen. Die Kraftstoffdaten spielen daher neben einer genauen Messung des Verbrauchs eine entscheidende Rolle.

$$C_{\text{Brennstoff}} = c_{\text{Brennstoff}} \cdot \dot{m}_{\text{Brennstoff}} \quad [39]$$

Die Werte für verschiedene Brennstoffe liegen als Defaultwerte im Programm vor, bei Verwendung alternativer Kraftstoffe ist aber eine Kraftstoffanalyse und die Eingabe der aktuellen Werte nötig.

In der Tabelle sind die Bereiche der Zusammensetzung anhand verschiedener Analysen innerhalb des Projektzeitraumes dargestellt. Ist keine aktuelle Kraftstoffanalyse vorhanden, so muss der Vertrauensbereich der Kohlenstoffbilanz sowie weiterer Überprüfungen um ca. 1.5% aufgeweitet werden.

	Diesel	Otto	Super	Super+
Kohlenstoffgehalt Gewichtsanteil	0.857-0.865	0.85-0.868	0.857-0.866	0.847-0.857
Wasserstoffgehalt Gewichtsanteil	0.135-0.142	0.131-0.136	0.127-0.134	0.126-0.136
Sauerstoffgehalt Gewichtsanteil	0-0.001	0.0006-0.015	0.0001-0.008	0.0013-0.023
Dichte bei 15°C kg/m ³	830-837	742-746	742-762	747-766
Heizwert MJ/kg	42.5-43	42.3-43.1	42.45-43.06	41.5-42.2

CO₂:

Die gasförmigen Bestandteile können sehr einfach unter Kenntnis der Molmassen von Raumanteile in Gewichtsanteile umgerechnet werden. Multipliziert mit dem Abgasmassenstrom ergibt sich dann der Kohlenstoffmassenstrom einer bestimmten Gaskomponente.

$$C_{ab_CO_2} = \dot{m}_{Abgas} \cdot CO_2 \cdot \frac{M_c}{M_{Abgas}} \quad [40]$$

CO und HC:

Der Kohlenstoffstrom resultierend aus der CO- und HC-Emission berechnet sich analog zur CO₂-Berechnung.

$$C_{ab_CO} = \dot{m}_{Abgas} \cdot CO \cdot \frac{M_C}{M_{Abgas}} \quad [41]$$

$$C_{ab_HC} = \dot{m}_{Abgas} \cdot HC \cdot \frac{M_C}{M_{Abgas}} \quad [42]$$

Damit kann die Kohlenstoffbilanz wie folgt geschrieben werden:

$$C_{zugeführt} = C_{abgeführt} \quad [43]$$

$$C_{zugeführt} = c_{Brennstoff} \cdot \dot{m}_{Brennstoff} + g_{CO_2_Luft} \cdot \dot{m}_{Luft} \cdot \frac{M_C}{M_{CO_2}} \quad [44]$$

$$C_{abgeführt} = \dot{m}_{Abgas} \cdot \frac{M_C}{M_{Abgas}} \cdot (CO_2 + CO + HC) \quad [45]$$

Der prozentuale Unterschied zwischen zu- und abgeführtem Kohlenstoff stellt die Fehlerschwelle dar, die zur Auslösung einer Fehlermeldung führt. Verantwortlich für die Verletzung des Grenzwertes können bis dahin alle beteiligten Größen sein.

$$Differenz_{Kohlenstoffbilanz} = \frac{C_{zugeführt} - C_{abgeführt}}{C_{zugeführt}} \quad [46]$$

Nachfolgend stellt sich natürlich für jede Prüfmethode die Frage, wie groß die Residuen sein dürfen, bevor eine Fehlermeldung erfolgen soll. Hierzu ist eine Analyse des systematischen Fehlers notwendig. Die systematischen Vereinfachungen, die teilweise auch bewusst in Kauf genommen werden, sollen für die Kohlenstoffbilanz kurz erörtert werden. Als Erstes ist eine potentiell vorhandene Rußemission im Motor zu nennen. Kohlenstoff wird hierbei in fester Form im Abgas emittiert. Bei Vorhandensein von Rußpartikeln lagern sich auch stets einige Kohlenwasserstoffe an den Rußteilchen an. Die Partikel werden allerdings vor den Abgasmessleitungen in Filtern mechanisch abgeschieden, um eine Verschmutzung der gesamten Abgasmessstrecke zu vermeiden. Sie tauchen daher in den Abgaswerten nicht auf, ihr Kohlenstoffanteil wird also nicht in den Gleichungen berücksichtigt. Einzige Möglichkeit ist die Berücksichtigung einer Schwärzungszahl- oder Opazitätsmessung. Anhand einer Korrelation zwischen Schwärzungszahl und Rußemission soll der Einfluss auf das Residuum der Kohlenstoffbilanz abgeschätzt werden. Es wird angenommen, dass eine Schwärzungszahl von 3 gemessen wird, ein Wert, der sicherlich schon als Extremwert anzusehen ist. Im normalen Betrieb moderner Dieselmotoren werden Werte von 2 kaum noch übertroffen. Lediglich für

DoE-Prüfläufe wird der Betriebsbereich derart ausgedehnt, dass auch Werte über 3 auftreten können.

Im Zusammenhang mit dem Rußmessgerät AVL 415s gibt [18] einen Zusammenhang zwischen Rußkonzentration RK und Schwärzungszahl SZ in folgender Form an:

$$RK = 12.22 \cdot SZ \cdot e^{0.38 \cdot SZ} \quad [47]$$

Die Rußkonzentration bezieht sich allerdings auf die Masse in mg/m^3 , so dass zunächst sinnvolle Annahmen über das Abgasvolumen getroffen werden müssen. Die Abgastemperatur in Messortnähe (nach Turbinengehäuse) liegt bei diesen für Dieselmotoren fetten Betriebsbereichen bei ca. 700°C . Der Druck kann nach Turbine mit Umgebungsdruck angenähert werden. Mittels der idealen Gasgleichung kann damit auch der Volumenstrom ermittelt werden:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{p} \quad [48]$$

Die Abgasmasse kann mittels des stöchiometrischen Luftbedarfs abgeschätzt werden unter der Annahme, dass das Lambda 1 betragen soll. Andere Lambdawerte führen ohnehin nicht zu solch hohen Schwärzungszahlen.

$$\dot{m}_{\text{Abgas}} = \dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}} = \dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot (\lambda \cdot L_{\text{Stö}} + 1) \quad [49]$$

Setzt man die Werte ein und bezieht die Rußmasse auf die im Kraftstoff zugeführte Kohlenstoffmasse,

$$\frac{\dot{m}_{\text{Ruß}}}{\dot{m}_{\text{Brennstoff-Kohlenstoff}}} = \frac{RK \cdot (\lambda \cdot L_{\text{Stö}} + 1) \cdot R \cdot T_{\text{Abgas}}}{c_{\text{Brennstoff}} \cdot p_{\text{Umgebung}}} \quad [50]$$

so resultiert daraus eine Modellabweichung von 0.6%.

Als zweite Ungenauigkeit ist der Ölverbrauch zu nennen. Die Ölwanne stellt in Bezug auf die Kohlenstoffbilanz einen Kohlenstoffspeicher dar, in den Kohlenstoff eingetragen und auch ausgetragen werden kann. Der wichtigere Fall ist sicherlich in der Verbrennung von Öl zu sehen, gerade im Bereich der Mechanik-Dauerlaufprüfstände. Die Motoren werden dort lange Zeiten unter hohen Lasten betrieben, womit sie durchaus starkem Verschleiß unterliegen. Ölverbräuche von rechnerisch 1l/1000km sind dabei durchaus anzutreffen. Wird ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von 10l/100km für einen mittleren PKW-Dieselmotor angenommen, was bei den vorliegenden hohen Lasten durchaus gerechtfertigt ist, so beträgt der Kohlenstoffanteil aus dem Öl 1% des Kraftstoffanteils. Hierbei ist ein gleicher Kohlenstoffanteil in Öl und Dieselmotorkraftstoff vorausgesetzt.

Durch Brennraum-Wandbenetzung ist es möglich, dass Kraftstoff im Motoröl zwischen- oder eingelagert wird. Dieser Effekt kann gerade bei sehr langen oder späten Förderwinkeln auftreten, wenn die Einspritzstrahlen auf die verhältnismäßig kühlen Zylinderwände treffen. Der Kraftstoff passiert dann die Kolbenringe und gelangt unverbrannt in die Ölwanne. In diesem Fall sinkt die CO_2 -Emission unter den Erwartungswert ab, und es kommt zum Fehlerfall. Dies ist aber auch erwünscht, da unabhängig von der Interpretation dieser Ergebnisse ein für den Motor sehr bedenklicher Betriebszustand eingetreten ist, der die Aufmerksamkeit des Prüfpersonals erfordert.

Weitere Ungenauigkeiten sind in der Iteration der Feuchtekorrektur zu sehen, die aber nach Kontrollrechnungen keinen nennenswerten Einfluss besitzt. Lediglich die Annahme, Kohlenwasserstoffe würden im Kühler nicht auskondensiert, ist sicherlich für die höhersiedenden und aus dem Öl stammenden Anteile nicht richtig. Aus diesem Grunde sind die meisten Kohlenwasserstoffanalysatoren komplett beheizt, umgehen also den Gaskühler. Das Problem tritt folglich bei modernen Analysatoren nicht auf.

Ansonsten addieren sich die Einflüsse aus der Messungenauigkeit und der Digitalisierung aller beteiligten Messgeräte zu diesem systematischen Fehler hinzu. Da die Analyse der gesamten Messkette in der Praxis nicht möglich ist, wird anhand von Erfahrungswerten die Fehlerschwelle endgültig definiert.

Für die Kohlenstoffbilanz heißt das, dass sich zusätzlich zum größtmöglichen systematischen Fehler von 1.6% noch ca. 3.5% Messfehler hinzu addieren, womit eine Fehlerschwelle von 6% erreicht wird. Wird diese Fehlerschwelle überschritten, so ist von mindestens einer fehlerhaften Eingangsgröße auszugehen.

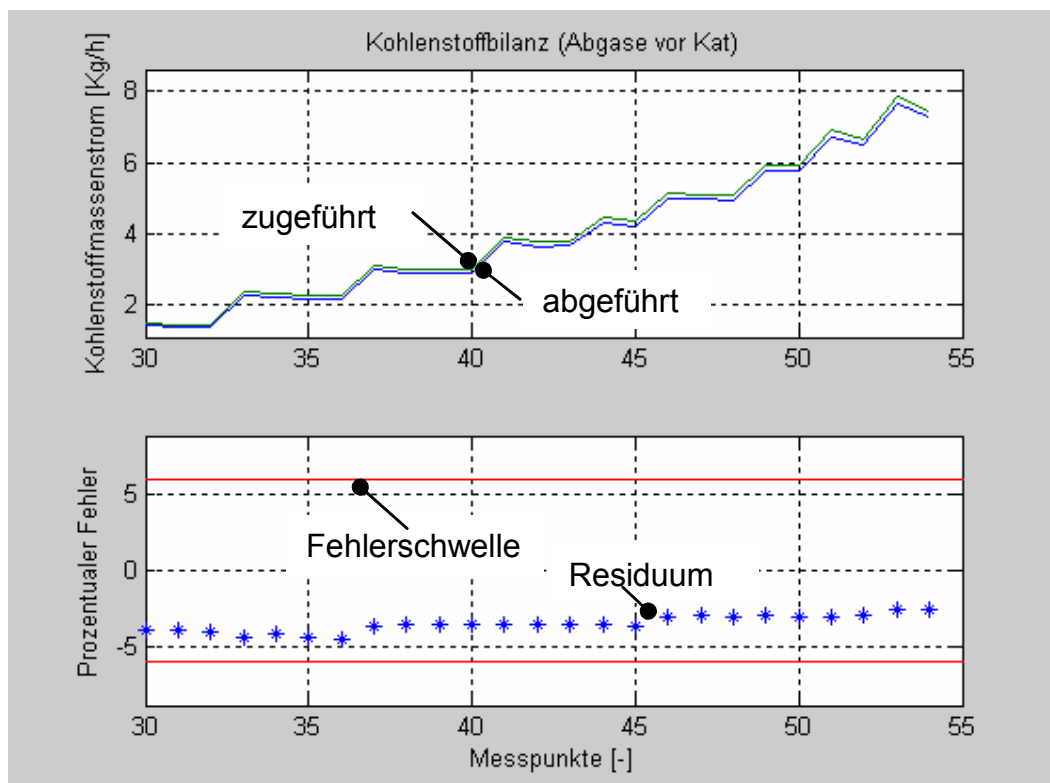


Abbildung 6.21: Modellgüte Kohlenstoffbilanz

Das gezeigte Beispiel aus dem Auswerteteil der Diagnosesoftware zeigt die Modellgüte anhand einer Vermessung eines 1.8 Liter Ottomotors auf. Trotz der Gemischanreicherung auf Lambdawerte von 0.75 im rechten Bereich der Grafik kann die Modellabweichung unter 5% gehalten werden. Dies beweist, dass die Annahmen zur Feuchtekorrektur in diesem Lambdabereich richtig sind.

Die Grundsätzliche Abweichung über den gesamten Test ist typisch und kann in durchgängig positiven als auch negativen Residuen resultieren. Dies liegt an Kalibrierfehlern, die ebenso vielfach über den gesamten Testzeitraum konstant bleiben.

6.3.2 Abgastemperaturmodell

Im Gegensatz zu den physikalischen Modellen, wie sie mit der Kohlenstoffbilanz repräsentativ dargestellt sind, ist es mit datenbasierten Modellen möglich, sehr viel komplexere Zusammenhänge darzustellen. Dies kann besonders dann von Vorteil sein, wenn nicht alle Modellparameter oder spezielle Messsensoren vorliegen.

Das folgende Abgastemperaturmodell basiert auf dieser Idee.

Neben einer physikalisch basierten Gesamtenergiebilanz zur Bestimmung der Abgastemperatur wurde zusätzlich ein empirischer Ansatz implementiert, der auch bei geringerer Messkanalanzahl eine Überprüfung der Abgastemperatur erlaubt. Die fehlenden Eingangsgrößen wurden in Form empirischen Wissens abgeleitet.

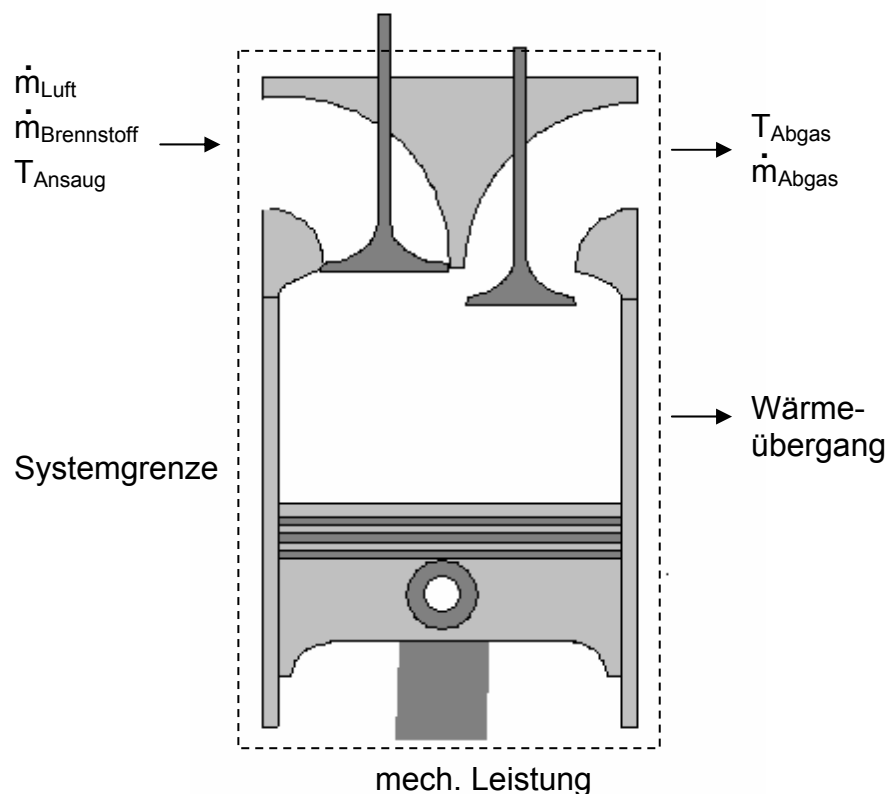


Abbildung 6.22: Prinzipbild Abgastemperaturmodell

Die Systemgrenze wird dabei direkt um die Zylindereinheit gelegt, d.h. es geht die Luft im Ansaugzustand und die Abgastemperatur in die Berechnung ein. Die im Abgas erreichbare Temperatur resultiert aus der zugeführten Energie (Brennstoff), der abgeführten Leistung, der abgeführten Wärmemenge und der Menge und dem Zustand der angesaugten Luft.

In einem ersten Schritt wird berechnet, welche Restenthalpie nach Abzug der mechanischen Arbeit im Gas verbleibt.

$$h_{\text{Rest}} = \frac{\dot{m}_{\text{Brennstoff}} \cdot Hu + \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot h_{\text{Ansaugluft}} - P_{\text{mech}}}{\dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}}} \quad [51]$$

Mittels eines empirischen Terms wird nun berechnet, wie viel von dieser Energie durch Wärmeübergang im Motor verbleibt, und wie viel Energie dem Abgas zur Verfügung steht. Dieser empirische Term beinhaltet folglich die Energieumsetzung durch den Wärmeübergang. Diese Größe ist messtechnisch nur sehr schwer zu fassen, eine empirische Darstellung verhilft hierbei zu einer deutlich einfacheren Betrachtung.

Die verwendeten Polynomparameter entstammen einer Regressionsrechnung über mehrere verschiedene Dieselmotoren. Auch hier zeigt sich eine Problematik dieser Diagnoseaufgabe. Die Modelle müssen ein möglichst breites Spektrum von kleinen PKW bis hin zu schweren LKW-Motoren abdecken.

Ein Polynommodell für nur einen Motor kann sehr leicht auf Prognosegenauigkeiten von wenigen °C gebracht werden. Ein Modell nur für Einzelmotoren bedarf allerdings eines Datenmanagements, das zurzeit an Prüfständen nicht bereitgestellt wird.

Die Eingangsgrößen für die Bestimmung des Wärmeübergangs sind:

- mittlere Kolbengeschwindigkeit (Kg)
- Verhältniszahl aus Zylindermasse / Zylindervolumen (mV)
- Lambda
- effektiver Mitteldruck (pme)
- Förderbeginn (FB)

$$\begin{aligned} \text{Anteil} = & a1 + a2 \cdot Kg + a3 \cdot Kg^2 + a4 \cdot Kg^3 + a5 \cdot pme + a6 \cdot pme^2 + a7 \cdot pme^3 + a8 \cdot kg \cdot pme \dots \\ & + a9 \cdot \lambda + a10 \cdot \lambda^2 + a11 \cdot Kg \cdot \lambda + a12 \cdot \lambda \cdot pme + a13 \cdot \lambda^2 \cdot pme + a14 \cdot FB + a15 \cdot FB^2 + a16 \cdot mV \end{aligned}$$

[52]

mit

$$mV = \frac{\dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}}}{n \cdot \text{Zyl} \cdot \left(\frac{Vh}{\text{Zyl}} \right)^{1.5}} \quad [53]$$

und den Parametern

a1 = -0.15132	a2 = 5.15354e-2
a3 = -2.22117e-3	a4 = -2.22117e-3
a5 = 3.83113e-5	a6 = -2.52931e-3
a7 = 4.52457e-5	a8 = -4.44392e-4
a9 = 0.16753	a10 = -1.01692e-2
a11 = -3.95608e-3	a12 = 7.38973e-3
a13 = -8.56254e-4	a14 = -3.02533e-3
a15 = 7.32692e-7	a16 = 0.97425

Mit dem im Abgas verbleibenden Anteil der Restenthalpie kann die Abgastemperatur berechnet werden. Hierzu ist allerdings die spezifische Wärmekapazität des Abgases notwendig, die aber gerade die Abgastemperatur als Eingangsgröße hat. Daher ist eine Iteration nötig, die ausgehend von einer geschätzten Wärmekapazität c_p von 1030 J/kgK eine vorläufige Abgastemperatur, und im nächsten Schritt eine korrigierte Abgastemperatur mit richtigem c_p berechnet. Dieses c_p entspricht der spezifischen Wärmekapazität von Luft, d.h. die chemische Zusammensetzung des Abgases bleibt unberücksichtigt. Lediglich der Temperatureinfluss ist im Polynom abgelegt. Solche Ungenauigkeiten in der Modellbildung können allerdings im empirischen Teil mit abgebildet werden, so dass daraus keine größeren Fehler resultieren.

$$T3_{Rech} = \frac{Anteil}{1030} \cdot h_{Rest} \quad [54]$$

$$c_{p_{Abgas}} = 5.0713e-10 \cdot T3_{Rech}^4 - 1.749e-6 \cdot T3_{Rech}^3 + 0.00211 \cdot T3_{Rech}^2 - 0.854 \cdot T3_{Rech} \quad [55]$$

$$T3_{Rech} = \frac{Anteil}{c_{p_{Abgas}}} \cdot h_{Rest} \quad [56]$$

Ein allgemein gültiges Modell setzt voraus, dass die Eingangsgrößen ausschließlich spezifische Größen oder Verhältniszahlen beinhalten, die für jeden Motortyp unabhängig von seiner Größe definiert werden können. Durch die Struktur der Rechnung liegt auch der Polynomwert als Verhältniszahl stets zwischen 0 und 1, d.h. auch hier geht die Motorgröße nicht ein. Erst in der Kombination des Polynomwertes mit physikalischen Ansätzen ist die Berechnung einer motorspezifischen Temperatur möglich.

Für die innerhalb des Projektzeitraumes zur Verfügung stehenden Dieselmotoren ist der Vergleich zwischen Modell und Messung in der nächsten Grafik aufgetragen.

Das Spektrum der vermessenen Motoren reicht von Dieselmotoren der untersten PKW-Leistungsklasse bis hin zu NFZ Motoren für schwere Zugmaschinen. Die Motoren und ihre technischen Daten sind in Anhang 10.2 detailliert aufgeführt.

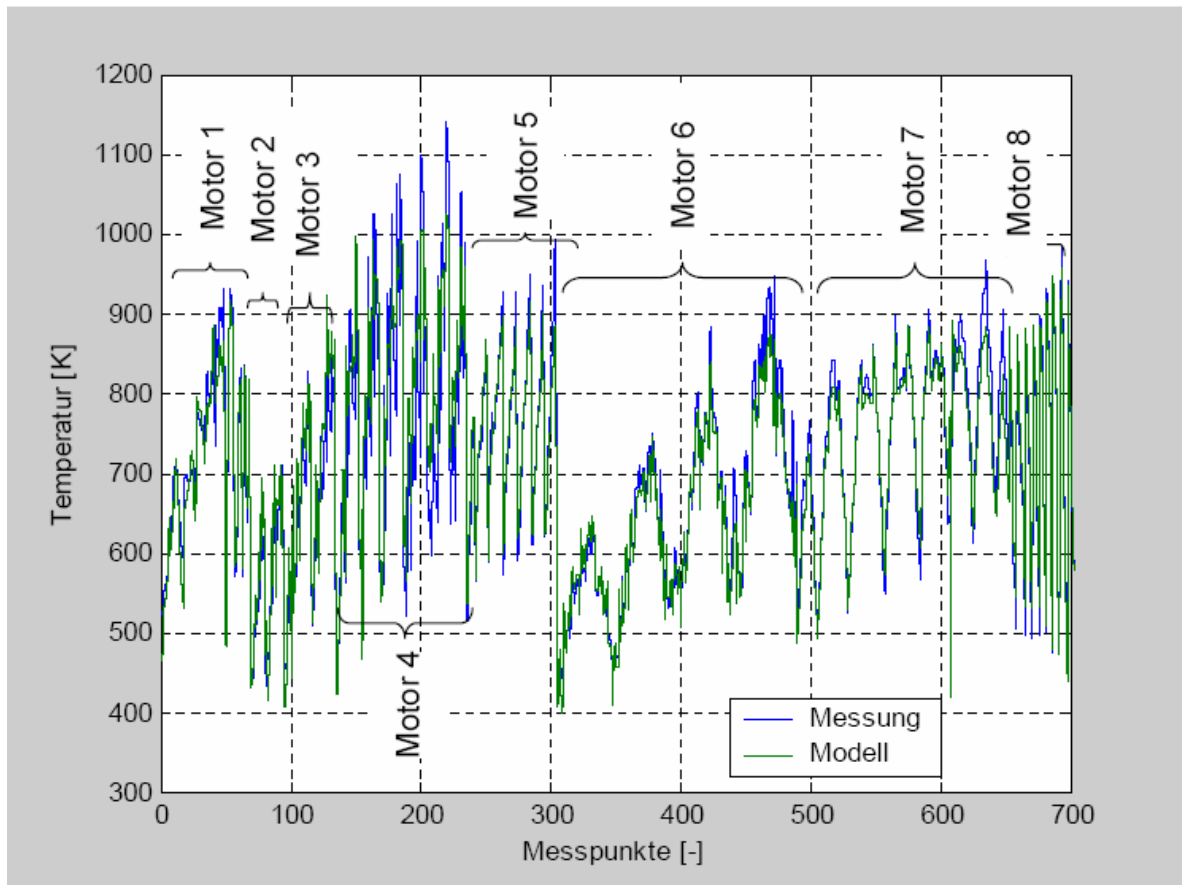


Abbildung 6.23: Berechnung der Abgastemperatur von Dieselmotoren

Die mittlere Modellabweichung, auch als Prognosegenauigkeit bezeichnet, liegt bei 29°, das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei 0,91.

Wie bei der Kohlenstoffbilanz muss auch für dieses Modell eine Fehlerschwelle definiert werden, bei deren Überschreitung eine Fehlermeldung erfolgt. Natürlich beinhaltet die Vorgehensweise eine Reihe systematischer Fehler.

Zunächst einmal entspricht die Modellbildung nicht den tatsächlichen physikalischen Gegebenheiten, die zu der Ausprägung einer bestimmten Temperatur führen. Auch wenn die zu- und abgeführten Enthalpien und Leistungen noch richtig bewertet werden, besteht doch im Wärmeübergang eine deutliche Unsicherheit.

Dieser ist unter anderem abhängig von der Brennraumgeometrie, d.h. von der wärmeaufnehmenden Oberfläche, vom Turbulenzgrad der Zylinderinnenströmung, sowie von der zeitlichen und räumlichen Wand- und Gastemperatur. All diese

Größen liegen am Prüfstand nicht vor, bzw. können überhaupt nicht gemessen werden. Die Allgemeingültigkeit kann dennoch erreicht werden, da Dieselmotoren geometrisch sehr ähnlich aufgebaut sind, die Verhältnisse also durchaus vergleichbar sind.

Die rein statistischen Werte zur Modellbewertung könnten bei entsprechender Parameterwahl deutlich besser sein. Allerdings wurde hier nicht auf eine Minimierung des mittleren Fehlers hingearbeitet, sondern die maximale Abweichung zwischen Modell und Messwert wurde durch einen entsprechenden Algorithmus minimiert. Damit verschlechterten sich zwar die oben genannten Werte, aber für die Fehlerdetektion ergeben sich so engere Grenzen, in denen die Abgastemperatur liegen muss.

Die maximale Abweichung über alle Motoren liegt bei 98°. Dies betrifft allerdings nur einige wenige Messpunkte, deren Richtigkeit nicht abschließend geklärt werden konnte.

Daher wurde die Vertrauensgrenze auf 100° eingestellt. Werte darüber sind zumindest auffällig und bedürfen der Kontrolle durch den Prüfstandsfahrer. Die konservative Auslegung begründet sich durch die Forderung nach minimalen Überdetektionsraten. Das heißt, es soll lieber ein Fehler übersehen werden, als dass der Prüfstandsfahrer von Fehlermeldungen überhäuft wird, die nach Durchsicht der Daten eher strittig sind. Hier entscheiden also letztlich die Anforderungen der Anwender.

6.3.3 Kontrolle des Turboladers

Nachdem inzwischen fast alle Dieselmotoren im PKW- und NFZ-Bereich mit einem Turbolader ausgestattet sind, und auch die Ottomotoren im Zuge des Bestrebens nach Downsizing immer häufiger eine Turboaufladung erhalten, gewinnt eine speziell auf Turbolader abgestimmte Diagnose an Bedeutung.

Prinzipiell können 4 Zusammenhänge in Form von Kennfeldern definiert werden:

Für den Verdichter liegen zwei Kennfelder vor. Das erste setzt das Totaldruckverhältnis über Verdichter, den reduzierten Luftmassenstrom sowie die reduzierte Laderdrehzahl zueinander in Beziehung. Daneben lässt sich für dieselben Eingangsgrößen Druckverhältnis und Luftmassenstrom ein Wirkungsgradkennfeld darstellen. Die Größen sind alle nicht direkt mit Messdaten vergleichbar, sondern liegen in normierter Form vor. Die Zusammenhänge sind in den folgenden Grafiken verdeutlicht. Die normierten Eingangsgrößen ermöglichen den Vergleich auch unter geänderten Umgebungsbedingungen. Die Totalgrößen, gekennzeichnet durch ein kleines t im Index, beziehen sich auf die Zustandsgrößen, bei denen das Gas ideal zur Ruhe gebracht wurde. Entsprechende Gleichungen sind in [39] zu finden.

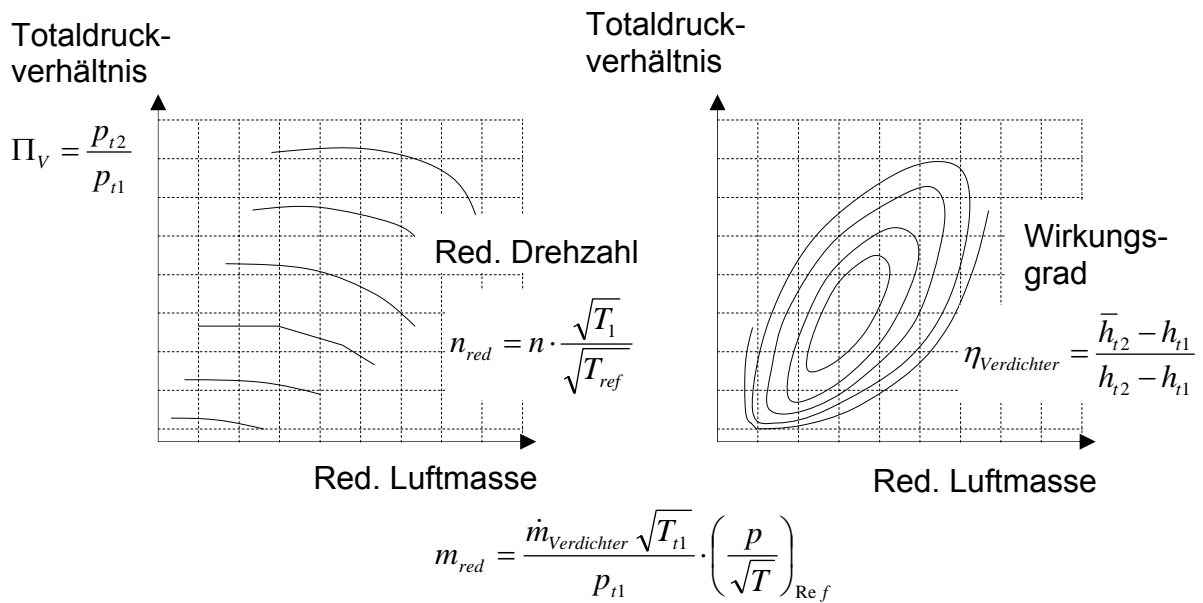


Abbildung 6.24: Kennfelder Verdichter

Ähnliche Zusammenhänge lassen sich für die Turbine definieren.

Der Massendurchfluss wird hierbei durch den Durchsatzparameter ersetzt. Dieser ist eine dimensionsbehaftete Größe, die neben "kg/s" auch noch die Einheiten "K^{0.5}/bar" enthält. Die Anschaulichkeit leidet darunter natürlich etwas. Auch das Druckverhältnis und die Drehzahl werden auf Turbinenseite in abweichender Form definiert. Die Zusammenhänge sind aber in der Grafik dargestellt. Im Falle einer VTG-Turbine kommt die variable Turbinengeometrie noch als weiterer Scharparameter hinzu. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird aber auf diese Darstellung verzichtet.

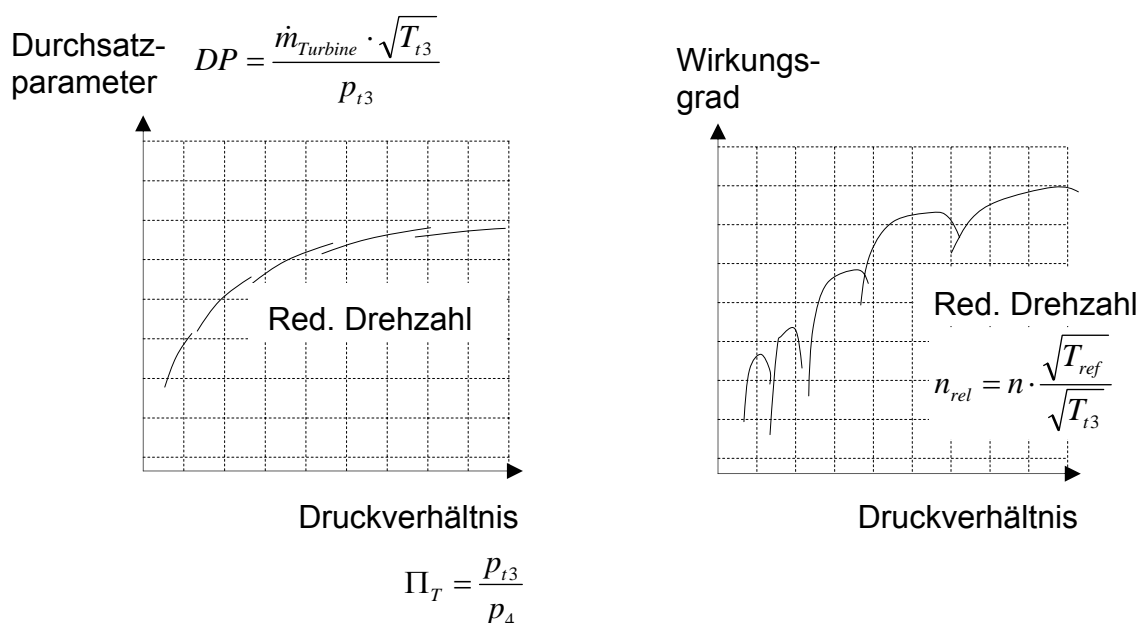


Abbildung 6.25: Kennfelder Turbine

In einer ersten Arbeit wurden sowohl Verdichter als auch Turbine auf der Basis physikalischer Zusammenhänge modelliert. Mittels einiger Geometriegrößen und der Nutzung von Ähnlichkeiten zwischen den Ladern sollte es damit möglich sein, die vier definierten Kennfelder zu erstellen. Am Beispiel des Verdichters soll die Strategie verdeutlicht werden.

Der Verdichter wird in einzelne Abschnitte eingeteilt, die mittels Stromfadentheorie berechnet werden. Die Gasgrößen sind dabei konstant über die jeweiligen Kanalquerschnitte, die wiederum anhand einer einfachen geometrischen Vermessung der Bauteile gewonnen werden.

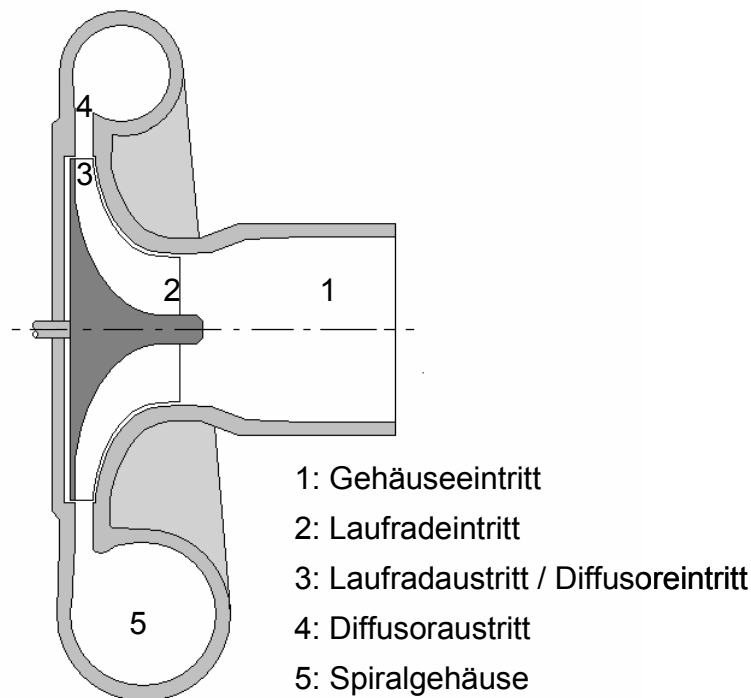


Abbildung 6.26: Verdichter schematisch

Im Punkt 1 werden die letzten Messwerte vor dem Verdichter aufgenommen. Von hier aus wird zunächst verlustfrei gerechnet, und an den Schnittstellen zwischen den Abschnitten erfolgt die Einbringung und Berechnung von Druck- und Wirkungsgradverlusten. Nur im Laufrad selbst werden gleichzeitig Verluste und Wärmeeintrag innerhalb der Stromröhre gerechnet.

Im verlustfreien Bereich gelten aufgrund der hohen Gasgeschwindigkeiten die Gleichungen für eine kompressible Strömung.

Im stationären Fall nimmt die Kontinuitätsgleichung dabei diese Form an.

$$\dot{m} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot c_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot c_2 \quad [57]$$

In Bereichen ohne Leistungübertragung vereinfacht sich weiterhin der Energiesatz zu

$$h_t = \text{Konst} = cp_1 \cdot T_1 + \frac{c_1^2}{2} = cp_2 \cdot T_2 + \frac{c_2^2}{2} \quad [58]$$

Die Gasgrößen ergänzen sich an den Abschnittsgrenzen anhand der idealen Gasgleichung.

$$p \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T \quad [59]$$

Druckverluste können in sämtlichen Bereichen des Verdichters am besten phänomenologisch eingebracht werden. Hierzu muss die Bernoullische Gleichung um einen Druckverlustterm ergänzt werden.

$$\rho_1 \cdot \frac{c_1^2}{2} + p_1 - \Delta p_{iv} = \rho_2 \cdot \frac{c_2^2}{2} + p_2 \quad [60]$$

Dieser ist für viele Verlustmechanismen definiert. Welche Verluste im entwickelten Verdichtermodell berücksichtigt wurden, soll kurz beschrieben werden.

- Kurz vor dem Verdichterlaufrad kommt es zunächst zu einer starken Beschleunigung der Strömung durch Versperrung [30]. Diese Bezeichnet die Abnahme des freien Querschnitts durch die Laufradnabe und die nicht zu vernachlässigende Schaufeldicke. Stoßverluste sind hierbei die Folge.
- Beim Übergang in das Laufrad kommt es zu Verlusten infolge der Strahlumlenkung, sofern die Strömung nicht dem Auslegungspunkt entspricht [36].
- Im Laufradkanal kommen Verlustterme aufgrund von Rohrreibung [34], Umlenkung [34], Spaltverlusten [25] und Scheibenreibung [9] hinzu. Gleichzeitig erfolgt in diesem Bereich der Wärmeeintrag von der Turbinenseite, der für die Wirkungsgradcharakteristik notwendig ist.
- Am Austritt des Verdichterlaufrades addieren sich hierzu Verluste aufgrund von Minderumlenkung [16] durch nicht schaufelkongruente Strömung. Dieser Verlust an tangentialer Geschwindigkeitskomponente geht direkt in die Eulersche Turbinengleichung ein, die den Leistungsumsatz im Verdichter beschreibt.

$$Md_{\text{Verdichter}} = \dot{m} \cdot (r_2 \cdot cu_2 - r_1 \cdot cu_1) \quad [61]$$

- Die Verluste im Diffusor können mittels Plattenreibung [26] bestimmt werden.
- Im Spiralgehäuse kommen nochmals Verluste durch Rohrreibung, Stoß und Umlenkung hinzu.

Dieses physikalisch basierte Modell kann anhand weniger, willkürlich gewählter Kalibrierpunkte verbessert werden, indem die Einzelverluste verdichterindividuell

gewichtet werden. Das Ergebnis einer solchen Anpassung zeigt die nächste Abbildung. Auf der linken Seite sind die Rohdaten anhand eines Herstellerkennfeldes dargestellt, auf der rechten Seite das physikalische Modell des Verdichters mit angepassten Verlusttermen.

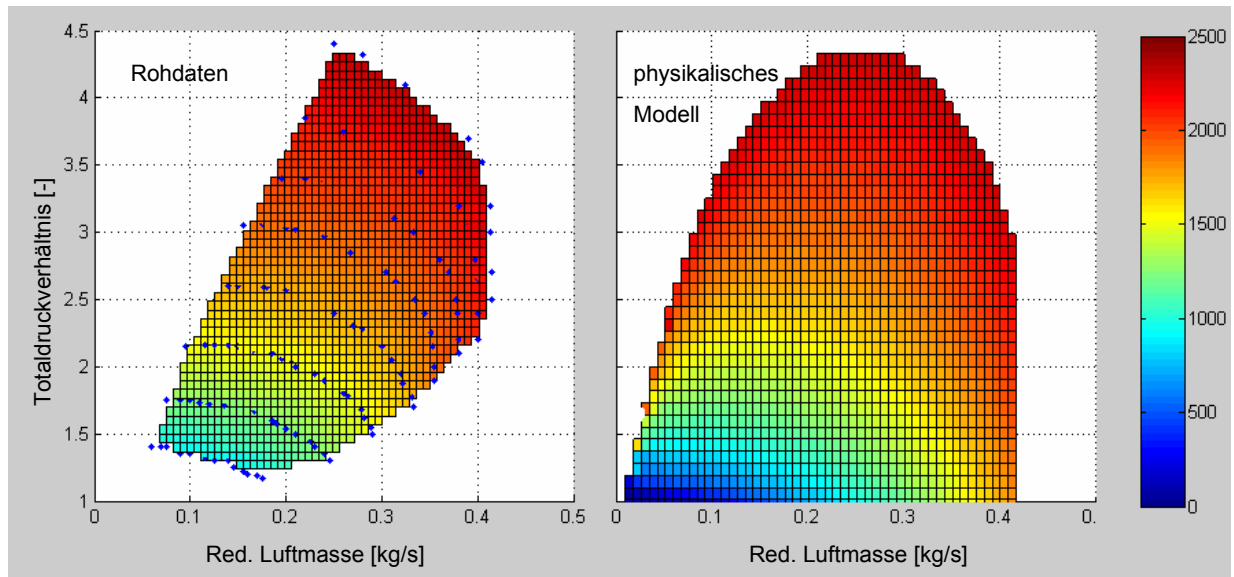


Abbildung 6.27: Ergebnis einer physikalisch-empirischen Verdichterrechnung

Dadurch, dass das physikalische Verhalten als Formelwerk vorliegt, können nahezu beliebige Punkte im Gesamtkennfeld berechnet werden.

Diese Vorgehensweise funktioniert für größere Lader ausreichend gut, so dass man damit eine Prüfstandsdiagnose durchführen kann.

Allerdings haben sich bei dieser Vorgehensweise Nachteile herausgestellt, die eine weitere Variante der Kennfeldablage nötig gemacht haben. Gerade bei sehr kleinen Ladern, wie sie bei Dieselmotoren unter 1.5 Liter Hubraum vorkommen, erscheinen die gezeigten Ansätze nicht mehr ausreichend, um mit vertretbarem Vermessungsaufwand ein solches Modell zu generieren. Gerade die Modellierung des Wirkungsgradkennfeldes zeigt hier deutliche Schwächen.

Aus diesem Grunde wurde noch eine Alternativlösung erarbeitet, die frei von Vermessungsarbeit ist, und sich lediglich auf die vom Hersteller gelieferten Kennfelder stützt.

Es wurde ein eigenes Programm entwickelt, das die Herstellerdaten aus einem standardisierten Excelfile einliest, aufbereitet und in einem neuronalen Netz ablegt. An dieser Stelle soll nicht die komplette Theorie der neuronalen Netze dargestellt werden, es sei nur kurz auf die einschlägige Literatur verwiesen. [7, 41].

Dieses neuronale Netz wird in der Onlineanwendung automatisch eingelesen und ausgewertet. Besonderer Wert musste hierbei wiederum auf die Minimierung des zusätzlichen Aufwandes gelegt werden. Dieser Forderung wurde Rechnung getragen, indem die einmal digitalisierten Kennfelder mit einfachsten Mitteln jedem Prüfstand mitgegeben werden können.

Parallel dazu soll das erzeugte Netz auch zur Simulation von Turboladern in Motormodellen befähigt sein, weswegen besonderer Wert auf eine flächendeckende

Interpolation des Kennfeldes gelegt wurde. Dies ist auch nötig, da es um das Aufspüren von Messfehlern geht. Das heißt, dass gerade auch im fehlerhaften Fall eine korrekte Berechnung der Kennfelddaten erfolgen muss. Der normale Betriebsbereich kann dabei durchaus verlassen werden, was eine gute Extrapolation erfordert.

Für die Berechnung von neuronalen Netzen anhand weniger Lerndaten sind einige Schritte notwendig, die im Folgenden erörtert werden. Der Kernpunkt liegt in der logischen und physikalisch basierten Vermehrung der Lernpunkte, um Problemen wie Oszillationen zwischen den Drehzahllinien und falscher Extrapolation vorzubeugen.

Als erster Ansatz zur Lösung dieses Problems werden zunächst die Werte innerhalb einer Drehzahllinie mittels polynominaler Ansätze interpoliert, da hierfür definierte und ausreichend viele Stützstellen vorliegen.

In weiteren Stufen werden diese Drehzahllinien nach rechts und links extrapoliert, wobei verschiedene Annahmen getroffen werden.

Im rechten Teil des Kennfeldes ist ein starker Abfall der Drehzahllinie gefordert, da sich im engsten Querschnitt des Laders Schallgeschwindigkeit einstellt. Hierdurch kann auch bei weiterer Entdrosselung des Verdichters keine weitere Steigerung des Massendurchsatzes erreicht werden (Stopfgrenze). Der Wirkungsgrad zeigt in diesem Bereich einen ebenso starken Abfall und wird bei $\Pi_V=1$ zu Null.

Dieser Ansatz kann sicherlich kritisch hinterfragt werden. Der Wirkungsgrad des Verdichters wird in manchen Arbeiten bei einem Totaldruckverhältnis von 1, d.h. bei fehlendem Druckaufbau, mit positiven Werten belegt [15]. Andere Arbeiten sprechen davon, dass der Wirkungsgrad bei $\Pi_V=1$ nicht definiert ist, da weder eine isentrope noch eine reale Zustandsänderung von p_1 nach p_2 definiert werden kann.

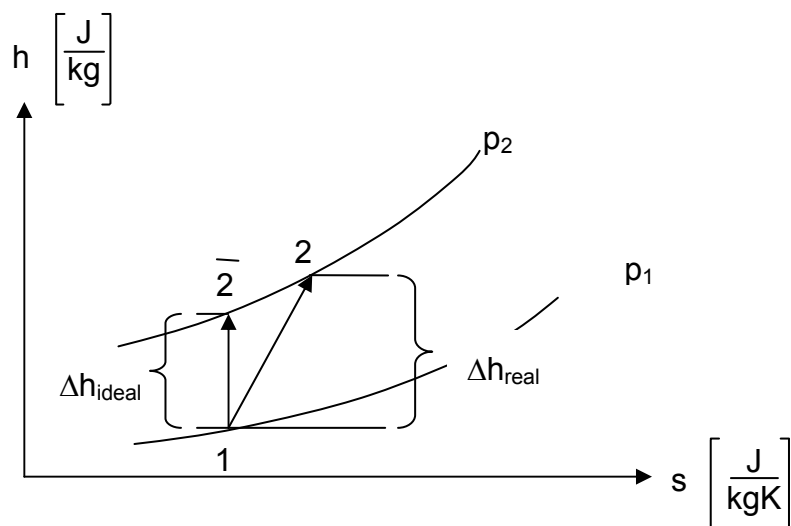


Abbildung 6.28: Definition des isentropen Verdichterwirkungsgrades

Sieht man sich aber die Formel des isentropen Wirkungsgrades genauer an, so wird klar, dass der Wert zumindest gegen Null gehen muss, was auch mit Arbeiten von [28] in Einklang steht. Der Zähler geht automatisch gegen Null, da ja $\Pi_V=1$ wird. Durch Wärmeleitung ist aber der Nenner gleichzeitig etwas größer 0, d.h. der Wirkungsgrad lässt sich unabhängig von der Interpretation dieses Wertes berechnen.

$$\eta_{\text{Verdichter}} = \frac{\bar{h}_{t2} - h_{t1}}{h_{t2} - h_{t1}} = \frac{\left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left(\frac{T_{t2}}{T_{t1}}\right) - 1} \quad [62]$$

Die Wärmeleitung ist auch dafür verantwortlich, dass die Überprüfung des Wirkungsgrades auf Totaldruckverhältnisse >1.3 beschränkt bleibt. Der Wert von 1.3 ist hierbei ein empirischer Wert, über dem die Einflüsse der Wärmeleitung ausreichend hinter den Einflüssen der Temperaturänderung durch Druckaufbau zurücktreten.

In den darunter liegenden Kennfeldbereichen kann der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Turbineneintrittstemperatur um bis zu 12% variieren [15]. Eine Wirkungsgraddiagnose ist folglich in diesen Bereichen ohne vorherige Vermessung des Gesamtsystems nicht möglich. Die hierzu durchgeführten Arbeiten, mit denen der Verdichterbereich bis in inverse Druckverhältnisse extrapoliert werden kann [14, 31], liefern sicherlich zur Systemsimulation wertvolle Ergebnisse. Für eine Diagnose scheinen sie aber in Anbetracht der Untersuchungen zum Einfluss der Wärmeleitung nicht ausreichend.

Die Annahme, dass der Wirkungsgrad bei $\Pi_V=1$ zu 0 wird, ist dennoch wichtig, um die Qualität der Extrapolation in diesen Bereichen in physikalisch sinnvolle Werte zu zwingen.

Der linke Teil des Kennfeldes ist begrenzt durch die Pumpgrenze, die den stabilen vom instabilen Betriebsbereich trennt. Gerade bei Beschleunigung des Motors fällt ein großer Teil der Betriebspunkte sehr nahe an diese Grenze, weswegen auch hier eine Extrapolation stattfinden muss. Es besteht damit die Möglichkeit, zumindest die harmlosere Form des Pumpens, das so genannte Surge, mit abzubilden [14].

Hierzu werden Ansätze von More und Greitzer [24] in Verbindung mit der Theorie des radialen Gleichgewichts verwandt.

Im folgenden Bild ist eine typische Drehzahllinie abgebildet. Sie beginnt rechts mit der Stopfgrenze, und hat ihren stabilen Betriebsbereich bis hin zum lokalen Maximum bei positiven Massenströmen. Der nachfolgende Abfall ist der instabile Bereich, der im Falle des Surge oder des Deep Surge, also des klassischen Verdichterpumpens mit Umkehr der Strömungsrichtung periodisch durchlaufen wird.

Für die Diagnose ist hierbei eine Extrapolation bis zu Massendurchsätzen von 0 ausreichend. Negative Massenströme fallen ohnehin durch die isolierte Betrachtung des Luftmassensignals auf.

Der rechte Teil des Kennfeldes kann wie schon angesprochen sehr einfach mittels eines quadratischen Polynoms extrapoliert werden. Da die Pumpgrenze in den Basisvermessungen schon meist mit angedeutet wird, resultiert hieraus der gewünschte starke Abfall der Drehzahllinie. Auch wenn die Randbedingung der Stopfgrenze, nämlich gerade Schallgeschwindigkeit im engsten Querschnitt, sehr einfach abschätzbar erscheint, so ist doch die präzise Berechnung dieser Grenze sehr komplex. Hierzu müssen die vereinfachten, eindimensionalen Rechnungen (Stromfadentheorie) verlassen werden. Da in diesem Bereich aber ohnehin keine Motorschlucklinie mehr liegt, ist eine gute qualitative Extrapolation für eine Fehleranalyse ausreichend.

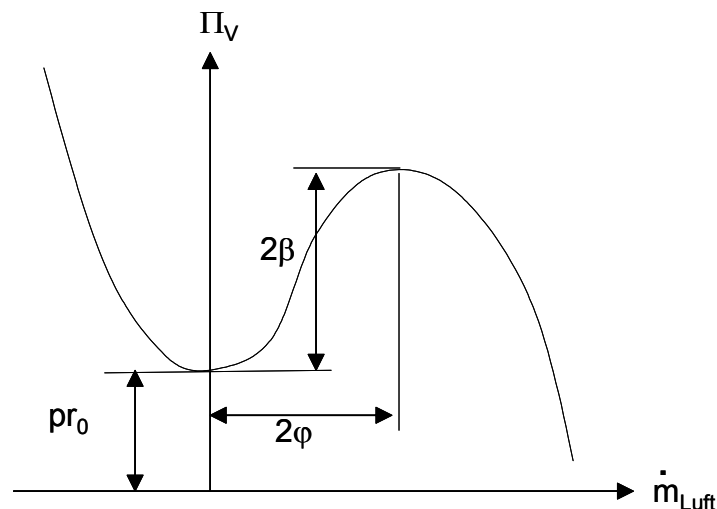


Abbildung 6.29: Drehzahllinie eines Radialverdichters

Eine Extrapolation links der Pumpgrenze kann mittels eines Polynoms dritten Grades erfolgen nach folgendem Zusammenhang,

$$p_r = p_{r0} + \beta \cdot \left[1 + 1.5 \cdot \left(\frac{\dot{m}_c}{\varphi} - 1 \right) - 0.5 \cdot \left(\frac{\dot{m}_c}{\varphi} - 1 \right)^3 \right] \quad [63]$$

Diese Gleichung stellt eine Näherungslösung für ein Differenzialgleichungssystem dar, das auf [24] zurückgeht, und eine Verdichterscheibe im dynamischen Zusammenspiel von Einlaufstrecke, Speichervolumen (Saugrohr) und Ventil (Motor) darstellt. p_{r0} kann mittels des radialen Gleichgewichts ermittelt werden [16]. Dieses führt dabei gerade zu dem statischen Druck, der sich aufgrund der Zentripetalkräfte bei Durchflüssen von 0 bei einer bestimmten Drehzahl des Verdichters einstellt. Damit liegt neben den Messwerten aus dem Kennfeld auch der y-Achsenabschnitt physikalisch begründet fest.

$$\frac{dp}{dr} = \rho \omega^2 r \quad [64]$$

Integriert man obige Gleichung und eliminiert die Dichte mittels der idealen Gasgleichung, so erhält man das Druckverhältnis bei einem Luftmassenstrom von 0.

$$p_{r0} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2 \cdot \gamma \cdot R \cdot T_1} \omega^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad [65]$$

Die Radien des Verdichterrades können in den meisten Fällen direkt der Verdichterbezeichnung entnommen werden, was eine geometrische Vermessung des Verdichters überflüssig macht.

Der Wirkungsgrad hingegen wird mittels des dimensionslosen Drehmomentkoeffizienten ermittelt, der aufgetragen über dem Durchflusskoeffizienten linear extrapoliert werden kann [32].

Der Drehmomentkoeffizient ist dabei

$$\Gamma = \frac{\tau}{\rho \cdot A \cdot r \cdot U^2} \quad [66]$$

Gleichzeitig gilt:

$$\tau = \frac{\dot{m} \cdot (h_2 - h_1)}{\omega} \quad [67]$$

was zu

$$\tau = \frac{30 \cdot \gamma \cdot R \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot T_1}{\pi \cdot n \cdot (\gamma - 1) \cdot \eta_c} \left(pr^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right) \quad [68]$$

umgeformt werden kann. Wird dieses Drehmoment mittels Formel 66 dimensionslos über dem Durchflusskoeffizienten aufgetragen, so kann eine lineare Interpolation erfolgen. Der Durchflusskoeffizient selbst wird mittels

$$\Phi = \frac{c_x}{U} = \frac{\dot{m}_c}{\rho \cdot A \cdot U} \quad [69]$$

berechnet.

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist im folgenden Bild für eine Drehzahllinie ersichtlich.

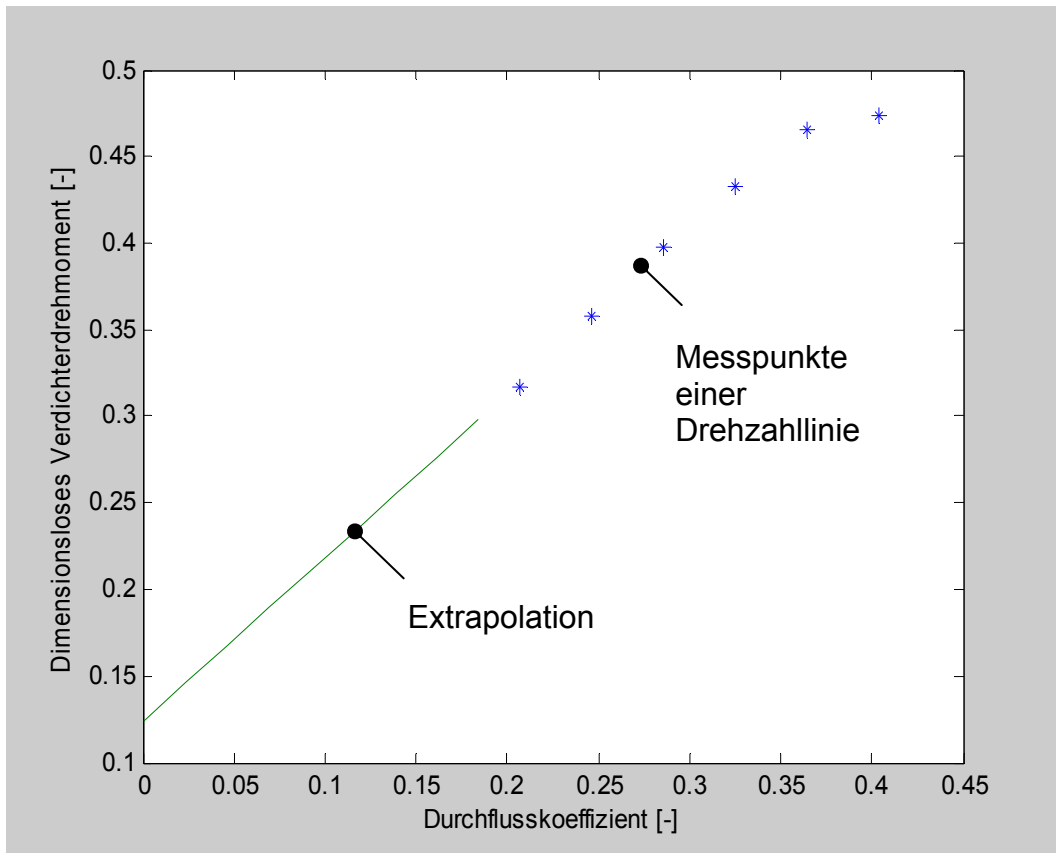


Abbildung 6.30: Verdichterdrehmoment über dem Durchflusskoeffizienten

Anhand des extrapolierten dimensionslosen Drehmoments kann rückwirkend auf den Wirkungsgrad geschlossen werden. Zwischen Nulldurchgang des Massenstroms und Stopfgrenze sind jetzt folglich Drehzahl- als auch Wirkungsgrade bestimmt, so dass ausreichend Lerndaten zum Trainieren eines neuronalen Netzes zur Verfügung stehen. Das Ergebnis ist eine flächendeckend gut interpolierte Information über das Verdichterverhalten auch in den Regionen, die in den Basisdaten noch nicht bestimmt waren. Mittels dieser teils physikalischen, teils empirischen Extrapolation kann der große Nachteil der neuronalen Netze, nämlich die mangelhafte Extrapolation über die Lerndaten hinaus, behoben werden. Für eine Diagnosesoftware ist dies besonders wichtig, da es durch nicht bestimmte Bereiche oder durch falsch extrapolierte Werte zu Programmschwierigkeiten kommen kann.

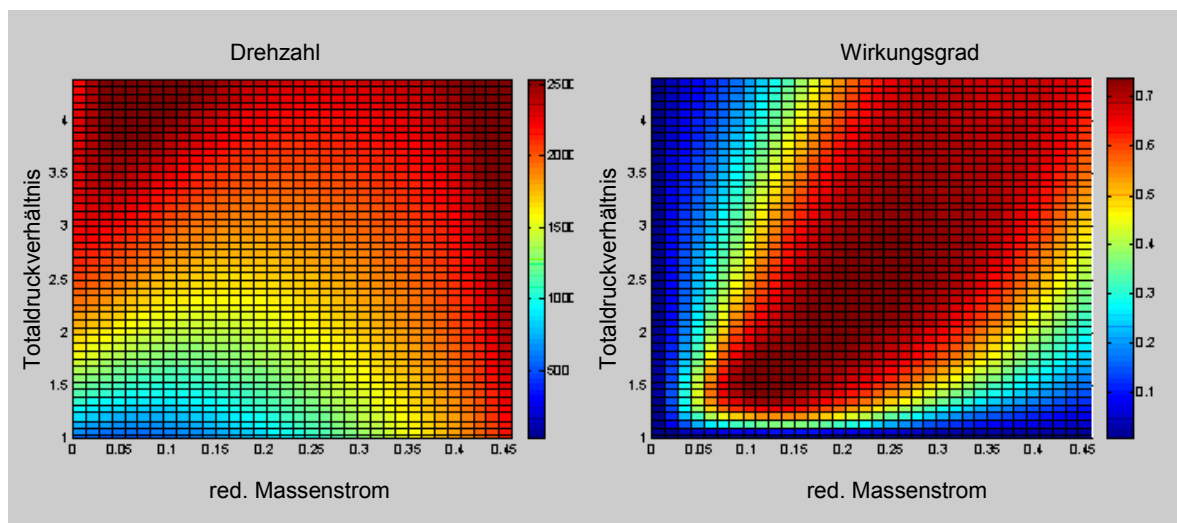


Abbildung 6.31: Inter- und Extrapolation des Verdichter kennfeldes

Der verwendete Netztyp ist ein vorwärts gerichtetes Netz mit zwei Ebenen, das aufgrund des Lösungsalgorithmus als Feed-Forward Backpropagation Netz bezeichnet wird [7].

Die Netze haben jeweils zwei Eingangsgrößen, nämlich das Totaldruckverhältnis sowie die reduzierte Luftmasse. Die Ausgangsgröße ist wahlweise die reduzierte Laderdrehzahl oder der isentrope Wirkungsgrad.

In den beiden Netzen ist keinerlei physikalisches Wissen oder eine bestimmte Logik abgelegt, es handelt sich vielmehr um eine reine Datenablage. Der Vorteil bei richtig gewählter Anzahl von Neuronen ist die sehr glatte Interpolation ohne Überschwinger. Polynommodelle neigen gerade bei der Ablage des Wirkungsgrades zum Überspringen zwischen den Drehzahllinien, was mit dieser Vorgehensweise vermieden werden konnte.

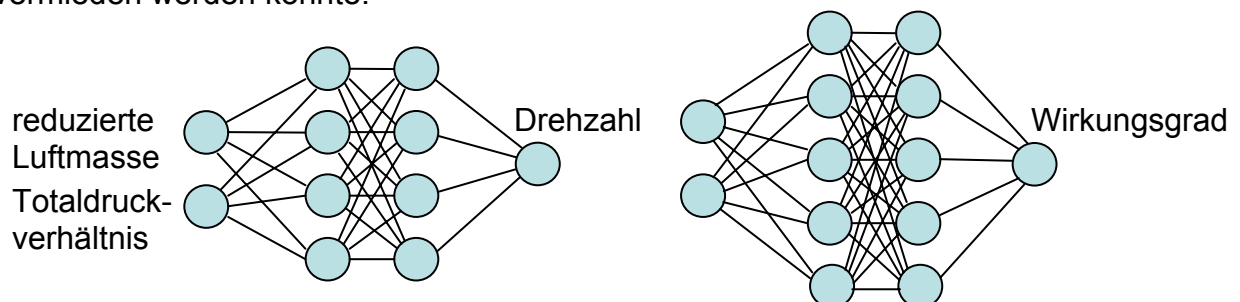


Abbildung 6.32: Struktur der verwendeten neuronalen Netze

Jedes Neuron beinhaltet nach Abbildung 6.33 eine Übertragungsfunktion, die das Verhalten des Neurons maßgeblich beeinflusst. Die Übertragungsfunktion der ersten zwei verdeckten Schichten ist vom Typ "tan-sigmoid", die des Ausgangsneuron ist "purelin" (Siehe auch Abbildung 6.34).

Hierzu ist eine kurze Erläuterung der Vorgänge an einem einzelnen Neuron notwendig:

Eingangswerte e

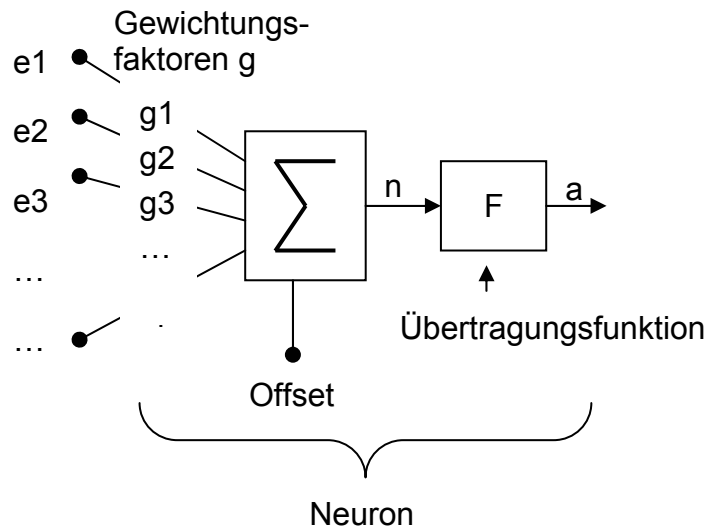


Abbildung 6.33: Vorgänge an einem Neuron

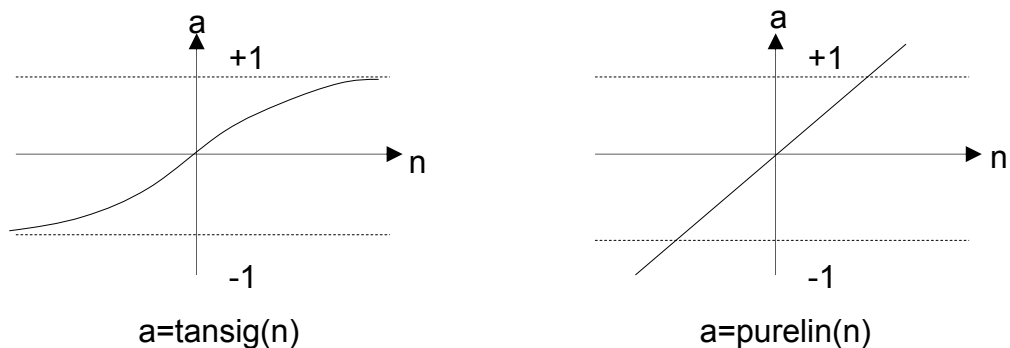


Abbildung 6.34: Verwendete Übertragungsfunktionen [7]

Innerhalb der Neuronen der ersten beiden verdeckten Schichten werden die Informationen gewichtet, aufsummiert, mit einem Offsetwert verrechnet und anschließend in Abhängigkeit des Funktionswertes der Übertragungsfunktion zwischen -1 und 1 weitergegeben. Werte darüber oder darunter werden nicht zugelassen. Im Ausgangsneuron werden alle Eingangsinformationen zusammenaddiert, d.h. der Ausgangswert kann beliebige Werte annehmen.

Die Güte des Kennfeldvergleichs kann anhand des folgenden Bildes, Ergebnis einer NFZ-Dieselmotorenvermessung, beurteilt werden.

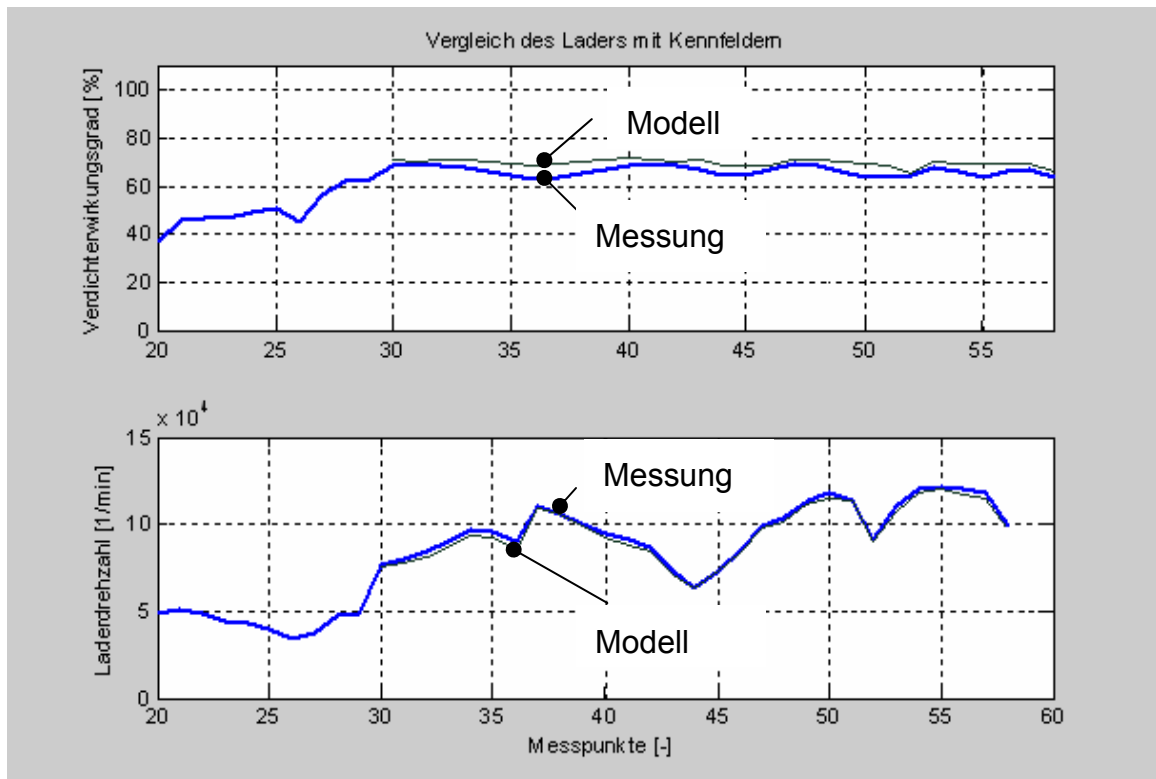


Abbildung 6.35: Ergebnisse des Kennfeldvergleichs (6-Zyl NFZ Diesel)

Der Wirkungsgrad stellt wie schon erwartet den sensibleren Teil dar, jedoch kann er mit einer Genauigkeit von $\pm 6\%$ dargestellt werden. Die Laderdrehzahl kann bis auf 3.6% genau angegeben werden.

Für die Diagnose werden als Fehlerschwellen Abweichungen vom Wirkungsgrad von 10%, und Abweichungen von der Laderdrehzahl von 5% zugelassen.

Wird bei höherwertiger Messausstattung ein größerer Wert auf Genauigkeit gelegt, sind diese Genauigkeitsangaben mittels einer Exceltabelle leicht editierbar.

Für die Turbine lässt sich mit ähnlichen Mitteln ein weiteres neuronales Netz erzeugen für den Zusammenhang zwischen Drehzahl, Durchsatzparameter und Druckverhältnis.

Die Betrachtung des Wirkungsgrades kann auf der Turbinenseite mittels der normalen Messtechnik und Ausstattung allerdings nicht erfolgreich durchgeführt werden. Die Gründe liegen in der hohen Dynamik der Gasgrößen im Abgaskrümmer mit den damit einhergehenden Problemen in der Messtechnik.

Wenn sich das Auslassventil öffnet, stellt sich stets ein sehr hoher Druckgradient ein, dem ein deutlich langsamerer Druckabbau folgt.

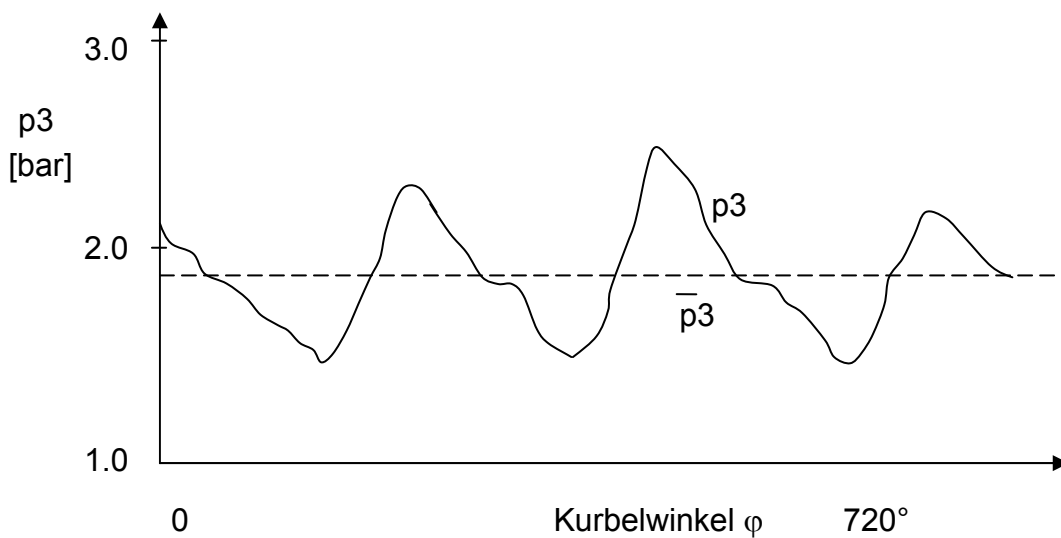


Abbildung 6.36: Besonderheiten der Abgasdruckmessung

Da die Drucksensoren der piezoresistiven Bauart meist temperaturempfindlich sind, werden sie über längere Druckleitungen mit der Messstelle verbunden. Der Strömungswiderstand dieser Messleitungen ist aber ungefähr proportional dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Daher wird der zum Sensor gerichteten Druckwelle ein höherer Widerstand entgegengesetzt als der abströmenden Druckwelle. Es stellt sich zwar unmittelbar am Sensor eine pulsierende Gasbewegung ein, jedoch ist aufgrund der dargelegten Strömungswiderstände der Mittelwert stets kleiner als im Krümmerrohr selbst [42].

Ähnliche Ungenauigkeiten treten bei der Temperaturmessung im Krümmerbereich auf. Die während des Ausströmens nach dem Öffnen der Auslassventile vorliegenden heißen Abgase haben am Sensor nur eine geringe Verweilzeit. Eine größere Verweilzeit ist den Gasmengen vorbehalten, die kurz vor „Auslass schließt“ den Zylinder verlassen. Hierbei handelt es sich aber zu Teilen um Spülluft (Ventilüberschneidung), die sich durch deutlich niedrigere Temperaturen auszeichnet. Beide Effekte führen zu einem scheinbar höheren Wirkungsgrad der Turbine, der gerade in der Teillast leicht Werte von 300% erreichen kann. Diese rein rechnerischen Werte beschreiben natürlich nicht den korrekten physikalischen Sachverhalt.

Eine korrekte Messung von Druck und Temperatur erfordert einen deutlich aufwändigeren Messaufbau, der aber sicherlich nicht durchgängig am Prüfstand umzusetzen ist. Aus diesem Grunde ist mit den dargelegten Mängeln umzugehen und ein überhöhter Wirkungsgrad zuzulassen. Eine Grenzwertbetrachtung des Wirkungsgrades bei höheren Turbinendruckverhältnissen ist in diesem Falle aber ausreichend, um entsprechende Fehler zu detektieren.

6.3.4 Übersicht über die umgesetzten Plausibilitätsprüfungen

An dieser Stelle erfolgt eine Beschreibung der wesentlichen Methoden in ihren Grundzügen für den Onlinebetrieb bei laufendem Motor. Auf diese wird aus Gründen der Übersichtlichkeit und des Know How Transfers nicht so detailliert eingegangen wie auf die drei ausgewählten Methoden in den Kapiteln zuvor.

6.3.4.1 Bilanzgleichungen

Die vorgestellten Bilanzgleichungen kommen bis auf wenige Teilaspekte ohne jegliche Empirie aus, sind folglich bei hoher Genauigkeit gültig für sämtliche Motortypen. Die Energiebetrachtungen basieren auf dem 1. HS der Thermodynamik, die Stoffbilanzen auf der Kontinuitätsgleichung in Verbindung mit den chemischen Zusammenhängen bei der Umsetzung von Kraftstoff mit Luft.

1. Sauerstoffbilanz

Die Systemgrenze für diese physikalische Massenbilanz wird um den gesamten Motor herum gelegt. Sauerstoff wird hauptsächlich über die Ansaugluft des Motors zugeführt. Enthält der Kraftstoff Sauerstoff in gebundener Form, so wird auch dieser berücksichtigt. Der Sauerstoff verlässt das System über den Abgasmassenstrom in den Verbindungen O_2 , H_2O , CO_2 , CO und NO_x .

Das Residuum berechnet sich aus der prozentualen Differenz der zu- und abgeführten Sauerstoffmassenströme. Eine zu hohe Abweichung wird meist durch fehlerhafte Kalibrierungen im Sauerstoffanalysator oder durch das Auftreten von Leckage in der Abgasmesskette hervorgerufen.

Alternativ werden dieselben Gleichungen mit den Abgaswerten vor oder auch nach Kat oder DPF ausgewertet.

2. Kohlenstoffbilanz

Siehe 6.3.1

3. Vergleich von λ aus Luft und Kraftstoff und λ nach Brettschneider

Basierend auf einer Verknüpfung von Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Wasserstoffbilanz kann ein Lambdawert ausschließlich aufgrund der Abgaswerte berechnet werden. Es wird die Berechnungsvorschrift nach Brettschneider verwandt, die jedoch zu ihrer Nutzung am Prüfstand vereinfacht werden muss. Die Terme zum Schwefelgehalt des Kraftstoffs, zur Luftfeuchte, zur Rußemission und einiger weiterer Spurengase, deren Bestimmung am Prüfstand nicht üblich ist, wurden nach Prüfung vernachlässigt. Der zweite Lambdawert resultiert aus chemischen Betrachtungen des Kraftstoffes und den Messgrößen von Luft- und Kraftstoffmassenstrom.

Das Residuum bildet sich aus dem prozentualen Unterschied zwischen den beiden berechneten Lambdawerten. Fehlerursachen können neben falsch kalibrierten CO_2 - und O_2 -Sensoren vor allem Fehler in der Luft- und Verbrauchsmessung sein.

Alternativ wird die Gleichung nach Brettschneider mit den Abgaswerten nach Kat oder DPF ausgewertet.

Die Gleichungen basieren auf den Ansätzen der Sauerstoff- und Kohlenstoffbilanz. Trotzdem ergeben sich durch die unterschiedliche Struktur der Gleichungen Vorteile hinsichtlich der Fehlerisolation.

4. Vergleich von λ aus Luft und Kraftstoff mit gemessenem λ

Um von der Abgasmessung unabhängig zu werden, wird in diesem Modell der zweite Lambdawert entweder anhand einer Messsonde (2-Punkt- oder Breitbandsonde) oder der motoreigenen ECU gewonnen. Damit ergeben sich zusätzlich die Überprüfung der beteiligten Lambdasonden sowie eine weitere Verbesserung der Fehlerisolation im Bereich der Abgas-, Luft- und Verbrauchsmessung.

Auch hier ist als Fehlerschwelle ein prozentualer Fehler definiert. Je nach verwendetem Lambdawert ist allerdings auf stark unterschiedliche Gültigkeitsbereiche zu achten. 2-Punkt Lambdasonden erlauben den Vergleich nur in einem sehr schmalen Fenster um 1.

5. Vergleich von λ aus den Abgasemissionen mit gemessenem λ

Die Ansätze der Gleichung basiert vollständig auf den Methoden 3 und 4. Der Grund für die separate Darstellung dieses Zusammenhanges ist darin zu suchen, dass je nach Messkanalbestückung nicht alle Methoden gleichermaßen angewandt werden können. Um dennoch eine maximale Anzahl von Gleichungen aktivieren zu können, ist folglich auch jede mögliche Formulierung eines Zusammenhanges nötig.

Ebenso steigt die Möglichkeit der logischen Schlussfolgerung bei höherer Gleichungszahl an.

Der Lambdawert aus den Abgasgrößen lässt sich je nach Datensatz mit den Zahlenwerten vor, und/oder nach Kat und DPF auswerten. Als gemessener Lambdawert kommt wie auch in Methode 4 ein Sondenwert oder auch der Modellausgang der ECU in Frage. Verletzungen des Residuums sind meist auf fehlerhafte Abgasmessung zurückzuführen.

6 Vergleich verschiedener Lambdasonden

Häufig sind Forschungsprüfstände mit Breitbandsonden ausgerüstet, so dass der gesamte Lambdabereich erfasst werden kann. In einem schmalen Fenster um 1 kann dieser Wert mit dem einer 2-Punkt-Sonde abgeglichen werden. Liegt als Vergleichswert der Rechenwert aus der ECU zugrunde, so kann dieser Vergleich im gesamten Betriebsbereich erfolgen.

Fehlerursache sind meist die Breitband-Lambdasonden, die erfahrungsgemäß in einem Zeitraum von ungefähr einem Jahr ihre geforderte Genauigkeit verlieren.

7. Vergleich der Abgasmessung vor und nach Kat oder DPF

Liegen Abgaswerte vor und nach Katalysator oder DPF vor, so können daraus jeweils zwei Lambdawerte berechnet werden. Diese werden nachfolgend miteinander verglichen. Sehr vorteilhaft ist hierbei eine Fehlerimmunität gegenüber der Feuchtekorrektur und der Kraftstoffzusammensetzung, da sich diese Einflüsse bei korrekten Abgasmesswerten aufheben. Damit liegt ein sehr genaues Werkzeug zur Detektion von Leckage und Fehlkalibrierung von O₂, CO₂ und CO (nur Otto) vor.

8. Gesamtenergiebilanz

Die Gesamtenergiebilanz basiert auf der Lösung des ersten Hauptsatzes für offene Systeme. Die Systemgrenze wird um den gesamten Motor herumgelegt. Zugeführte Energien resultieren aus der Ansaugluft und dem Kraftstoffmassenstrom. Energie wird abgeführt über verschiedene Wärmetauscher, über den Abgasmassenstrom sowie durch Strahlung und Konvektion. Mechanische Leistung wird an die Belastungseinheit abgegeben. Die große Masse eines Motorblocks führt zu ebenso großen Mengen innerer Energie, so dass auch dieser Term nicht unberücksichtigt bleiben darf. Ansonsten ist auf genaue Einhaltung der thermischen Beharrung zu achten, was die Notwendigkeit einer Beharrungserkennung unterstreicht.

Das Modell bietet einen sehr guten Überblick über Teilwirkungsgrade und die globale Verteilung der eingebrachten Energie. Das Residuum beschreibt die prozentuale Differenz zwischen zu- und abgeführter Energie. Fehler entstehen vorzugsweise durch defekte Abgastemperatur- oder Verbrauchsmessung. Ansonsten werden natürlich größere Fehler aller beteiligten Messgrößen detektiert.

9. Abschätzung der Abgastemperatur

Diese Methode umgeht die Problematik einer umfassenden physikalischen Energiebilanz, indem Teile der physikalischen Gleichungen durch empirische Ansätze substituiert werden. Gleichzeitig wird die Systemgrenze näher um die Zylindereinheit, und nicht mehr um den gesamten Motor herum gezogen. Dadurch ergibt sich eine sehr viel häufigere Anwendbarkeit.

Zum Vorgehen im Detail siehe 6.3.2

10. Wirkungsgradbetrachtung

Die Einzelwirkungsgrade des Motors für Brennstoffumsetzung, Ladungswechsel, theoretischen und mechanischen Wirkungsgrad können anhand von Messdaten teilweise abgeschätzt oder auch exakt berechnet werden. Mittels zusätzlicher Annahmen über den Verbrennungswirkungsgrad kann der Gesamtwirkungsgrad des Motors berechnet und mit dem tatsächlichen Wert verglichen werden.

Da die Güte der Verbrennung mit einfachen Messgrößen (Zylinderdruckindizierung bleibt an dieser Stelle noch unberücksichtigt) nicht zu erfassen ist, bleibt die Genauigkeit der Methode durch die Schätzung dieses Teilwirkungsgrades begrenzt.

Es resultieren aus dieser Betrachtung ein maximaler und ein minimaler Wirkungsgrad, zwischen denen sich der tatsächliche Wert einstellen muss. Verletzungen resultieren hauptsächlich durch Fehler in der Verbrauchsmessung oder größere Ungenauigkeiten in der Druckmessung (Ladungswechselbetrachtung).

6.3.4.2 Abgasbetrachtungen

Der folgende Themenblock konzentriert sich auf eine Bestimmung von einzelnen Abgaskomponenten. Auch hierzu werden teilweise Bilanzgleichungen gelöst, wobei die Gleichungen allerdings so umgestellt werden, dass eine minimale Anzahl von Eingangsgrößen verwendet wird. Als Modelleingang dient vorzugsweise ein gemessener Lambdawert.

11. Überwachung von NO_x, CO und SZ

Kohlenmonoxid (CO), Stickoxid (NO_x) und die Rußemission (SZ) zeigen, aufgetragen über dem Luft-Kraftstoffverhältnis, eine jeweils typische Charakteristik. Anhand umfangreicher Motorvermessungen konnten Minimal- und Maximalwerte für die genannten Komponenten in Form von Polynommodellen abgelegt werden. Einzelmotoren können zwar deutlich unterhalb der ermittelten Maximalwerte liegen, wodurch nur große Ungenauigkeiten detektiert werden können, jedoch scheint es nicht möglich zu sein, ein Abgasmodell in solch einfacher Form mit der angestrebten Allgemeingültigkeit zu generieren. Dies kann mit der immer aufwändigeren Aktorik gerade bei Ottomotoren erklärt werden. Variable Steuerzeiten, AGR und Ladungsbewegungsklappen beeinflussen die Verbrennung derart, dass ohne detaillierte innermotorische Größen keine hohe Genauigkeit erwartet werden kann. Diese Größen (Brennraumlambda, Zylinderdruckindizierung, Summe aus innerer und äußerer AGR-Rate) liegen aber auch an modernen Prüfständen nur selten vor.

Allerdings kann mit diesen Einschätzungen eine wesentlich bessere Plausibilitätsbetrachtung erreicht werden als mittels einfacherer Grenzwerte.

12. NO_x-Berechnung

Für die Stickoxydmission bei Dieselmotoren kann bei entsprechender Messkanalausstattung ein NO_x-Wert redundant zum gemessenen Wert berechnet werden. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine Zylinderdruckindizierung sowie eine Luft- und Kraftstoffverbrauchsmessung. Die Druckindizierung ist notwendig, um den Verbrennungsschwerpunkt zu bestimmen, der die Schlüsselgröße dieser Berechnung darstellt. Es muss die AVL-Berechnungsvorschrift "Thermo2" [3] verwendet werden, da die Modellparameter auf diese Berechnung adaptiert sind. Einzelheiten hierzu sind in [12] nachzulesen.

Die Verwendbarkeit dieses Modells konnte bislang nur für Motoren mit Zylinderhubvolumen >0.8 Liter aufgezeigt werden.

13. Sauerstoffberechnung

Der Sauerstoffgehalt des Abgases wird anhand eines gemessenen Lambdawertes aufgrund chemisch-physikalischer Ansätze berechnet. Der Lambdawert kann wahlweise aus der ECU, einer Zweipunkt- oder einer Breitbandsonde stammen. Das Modell basiert auf der Kontinuitätsgleichung und den Reaktionsgleichungen von Kraftstoff mit Luftsauerstoff. Im Gegensatz zu Sauerstoff- und Kohlenstoffbilanz werden in diesen Modellen möglichst viele Eingangsgrößen durch Rechengrößen ersetzt, so dass tatsächlich ein Zusammenhang ausschließlich zwischen Lambda,

der Kraftstoffzusammensetzung und Sauerstoff resultiert. Dies bietet Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit und der Fehlerisolation.

Residuum kann hierbei allerdings nicht wie in den meisten Fällen der prozentuale Unterschied zwischen gemessenem und gerechnetem Sauerstoffgehalt sein, da es durchaus Werte von 0 gibt, bei denen dieses Residuum nicht definiert wäre. Das Residuum wird in diesem speziellen Fall bezogen auf einen mittleren Sauerstoffgehalt von 10%.

14. Kohlendioxidberechnung

Dieses Modell ist vergleichbar mit 13, jedoch sind die Gleichungen derart umgestellt, dass eine Funktion von CO_2 über λ resultiert. Lediglich bei unvollständiger Verbrennung, wenn hohe Anteile des Abgases aus unverbrannten Kohlenwasserstoffen bestehen, müssen diese in die Berechnung einfließen. Eine Berechnung dieser HC-Emissionen ist mit der erforderlichen Allgemeingültigkeit nicht genau genug möglich.

Sowohl die CO_2 - als auch die O_2 -Berechnung kann zum Vergleich mit Werten vor oder auch nach Kat und DPF genutzt werden.

15. NO-NO_x Vergleich

Werden NO und NO_x gleichzeitig gemessen, so können beide Werte miteinander in Form einer einfachen Ungleichung in Beziehung gesetzt werden. Eine echte NO-Berechnung kann damit nicht erreicht werden, da die Bildungsmechanismen von NO oder NO₂ einer einfachen Modellbildung im Wege stehen [23, 35].

6.3.4.3 Turboladerplausibilitäten

Die Modelle rund um den Turbolader beruhen auf dem 1. HS der Thermodynamik für die Enrgiebetrachtungen, Vergleichsprozessen mit Annahmen zu den einzelnen Zustandsänderungen und empirischen Modellen, die eine reine Datenablage darstellen.

16. Energiebetrachtung

Die in Turbine und Verdichter umgesetzten Leistungen spiegeln sich in den Gasgrößen vor und nach diesen Bauteilen wieder. Energieaufnahme und Abgabe gehen dabei mit Änderungen von Druck und Temperatur einher. Mittels der Massenströme können die einzelnen Enthalpieströme bestimmt und ins Verhältnis gesetzt werden. Die in der Turbine umgesetzte Leistung muss dabei immer etwas höher sein als die des Verdichters, da die Verluste durch Wärmestrahlung und Reibung in den Lagern des Laufzeugs nicht wieder in den Gasstrom auf Verdichterseite eingespeist werden.

Es handelt sich also um eine Ungleichung, die stets erfüllt sein muss. Auch zu hohe Verluste können mit dieser Analyse detektiert werden, wenn Annahmen über Lagerreibung und Wärmestrahlung gemacht werden. Dann ist allerdings zusätzlich zu den Gasgrößen auch noch die Laderdrehzahl erforderlich.

17. Verdichterwirkungsgrad

Liegen nur Messgrößen auf der Verdichterseite vor, so kann dort mit Kenntnis von Druck- und Temperaturwerten der isentrope Verdichterwirkungsgrad berechnet werden. Rechnerische Werte über 85% sind auf Messungenauigkeiten, vorzugsweise in den Temperaturen, zurückzuführen.

Ein zu geringer Wirkungsgrad kann damit kaum detektiert werden, da dieser im Bereich der Teillast tatsächlich auftreten kann. Die Methodik stellt also eine Abgrenzung in Richtung zu hoher Wirkungsgrade dar.

18. Turbinenwirkungsgrad

Ebenso erfolgt eine Betrachtung des Turbinenwirkungsgrades, allerdings ist der Gültigkeitsbereich aufgrund der in 6.4.3 dargelegten Gründe stark eingeschränkt. Rechenwerte von 300% können bei allgemein brauchbarer Kalibrierung der üblichen Messtechnik bei niedrigen Motorlasten auftreten. Dies stellt natürlich nur ein Rechenwert dar, der nichts über die Güte der Zustandsänderung in der Turbine aussagt. Daher wird diese Überprüfung nur bei hohen Lasten und einem ausreichenden Druckverhältnis aktiviert, so dass die in 6.4.3 genannten Probleme weniger starken Einfluss besitzen.

Bei den Wirkungsgradbetrachtungen ist meist eine fehlerhafte Temperatur Auslöser für Fehlermeldungen. Die Drücke gehen aufgrund der Formelstruktur weniger stark ein, bedürfen also größerer Ungenauigkeiten, bevor eine solche Meldung ausgegeben wird.

19. VTG Soll-Ist Abgleich

An VTG-Ladern (VTG: Variable Turbinengeometrie) wird die Einhaltung der Ladedruck-Sollwerte überwacht. Da ein Turbolader nicht mechanisch mit der Kurbelwelle, sondern nur über Gasströme mit dem Motor verbunden ist, kann in Abhängigkeit des Motorbetriebszustandes nicht jeder beliebige Betriebszustand im Lader erreicht werden. Genau das passiert mitunter bei DoE-Prüfläufen, die aufgrund der Modellbildungsqualität sehr große Variabilitäten hinsichtlich der Ladedrücke fordern. Weichen Ist- und Sollwert zu sehr voneinander ab, so leidet im Nachhinein die Modellbildung. Es liegt also hierbei kein Messfehler vor, aber es sind Probleme zu erwarten. Deswegen erfolgt eine Meldung an den Prüfstandsfahrer.

Auch Leckage, also ernst zu nehmende Bauteilfehler, können zu einer Diskrepanz zwischen Ist- und Sollwerten führen.

20. Kennfeldablage der Laderkennfelder

Um den Charakter der Ungleichungen und Grenzwertabschätzungen für die Turboladerdiagnose abzulegen, können Verdichter als auch Turbine in neuronalen Netzen als Modell abgelegt und stetig mit den aktuellen Messdaten abgeglichen werden. Siehe hierzu auch 6.3.3.

21. Druckverlustberechnung am Ladeluftkühler (LLK)

Wärmetauscher zur Kühlung der Ladeluft haben auch an unterschiedlichen Prüfständen sehr gut vergleichbare Druckverlustziffern. Diese liegen als Grenzwerte vor, und können online zur Berechnung eines Druckverlustes über LLK benutzt werden. Lediglich bei sehr geringen Luftmassenströmen und daraus resultierenden geringen Druckunterschieden sind Vorkehrungen gegen eine verfrühte Fehlerausgabe zu treffen.

Damit lassen sich z.B. Ölanlagerungen detektieren, die gerade im Dauerbetrieb turboaufgeladener Dieselmotoren häufig vorkommen. Gegenüber Temperatur- und Luftmassenfehlern ist das Modell hingegen eher unempfindlich.

6.3.4.4 Ungleichungen im Bereich Drücke / Temperaturen

Der Vergleich zwischen verschiedenen Drücken und Temperaturen stellt zwar keine echte Modellbildung dar, doch reagieren diese Gleichungen sehr viel empfindlicher auf Sensorfehler als einfache Grenzwertüberwachungen. Dies ist sehr hilfreich für Temperaturen, für die kein echtes Modell oder kein Vergleichsprozess definiert werden kann. Vorteilhaft ist weiterhin, dass sich durch die Einfachheit dieser Gleichungen fast in jedem Datensatz Größen finden lassen, die entsprechende Vergleiche zulassen.

22. Temperaturvergleiche

Zwischen den gängigen Gastemperaturen im Ansaug- und Abgasbereich (T0-T4) können 17 Ungleichungen definiert werden, die zu einer deutlich genaueren Abschätzung der Temperaturen führen als dies mit Grenzwertüberwachungen möglich ist. Es werden hierbei wie bei allen Ungleichungen keine echten Residuen generiert, sondern lediglich binäre Informationen erzeugt, ob die beteiligten Größen richtig sein können oder nicht.

Je nach Motortyp (Otto/Diesel, Lader/Saugmotor) kommen verschiedene Sätze von Ungleichungen zum Einsatz.

23. Druckvergleiche

Analog zu Methode 23. Für die gängigen Druckmessstellen p0-p4 lassen sich allerdings nur 8 solcher Ungleichungen formulieren.

24. Sonstige Vergleiche

Auch im Bereich der Kühlmittelversorgung, des Kraftstoffkreislaufes und der Öltemperaturmessung lassen sich derartige Ungleichungen zwischen Vor- und Rücklauf definieren.

6.3.4.5 Kontrolle der Indizierdaten

Die Kontrolle der Indizierdaten beschränkt sich auf die Ergebnisgrößen, die vom Indiziersystem in nahezu Echtzeit an das Messdatenerfassungssystem weitergegeben werden können. Dies sind im Allgemeinen folgende Größen:

AI10 und AI50 (Verbrennungsschwerpunkt) stellen den Kurbelwinkel dar, bei dem entweder 10 oder 50% des eingebrachten Brennstoffs umgesetzt, d.h. verbrannt sind. Der sich beim Schleppen des Motors oder auch bei gefeuertem Betrieb einstellende maximale Druck im Zylinder ist p_{max} , die Lage dieses Maximums wird mit a_{pmax} gekennzeichnet.

25. Überprüfungen im Schleppbetrieb

Anhand von Drehmoment und Kraftstoffverbrauch findet eine automatische Erkennung des Schleppbetriebs statt. Sobald dieser Fall eintritt, werden sowohl der thermodynamische Verlustwinkel als auch das Druckmaximum kontrolliert. Der Verlustwinkel kann hierbei fest vorgegeben werden (0-1°KW vor OT), die Überprüfung des Druckniveaus wird mittels einer polytropen Zustandsänderung und dem Verdichtungsverhältnis durchgeführt. Eine falsche Kalibrierung des Drucksensors oder eine falsche Lage der Winkelmarke zum oberen Totpunkt des Zylinders können damit wirkungsvoll erkannt werden.

26. Zündverzug

Auch wenn kein Schleppbetrieb gefahren wird, lässt sich eine Zuordnung vom Zündzeitpunkt zum Brennbeginn (AI10) darstellen. Mittels eines Polynommodells kann dieser Zündverzug online berechnet werden, um die Lage der Winkelmarke zu kontrollieren. Die Genauigkeit ist aufgrund der schwierigeren Randbedingungen bei gefeuertem Betrieb nicht so hoch wie bei der Überprüfung im Schleppbetrieb.

Als Eingangsgrößen dienen der Luft- und Brennstoffmassenstrom, AGR, Drehzahl und das Drehmoment.

27. Vergleich unterschiedlicher Zylinder

Die indizierten Mitteldrücke, die 10% Umsatzpunkte sowie die Verbrennungsschwerpunkte der Einzelzylinder werden miteinander verglichen, sobald mehr als ein Zylinder indiziert wird. Auffälligkeiten müssen in diesem Fall nicht unbedingt von Messfehlern stammen, sondern können auch auf einen fehlerhaften Zylinder oder Aussetzerbetrieb hinweisen. Für Ottomotoren sind aufgrund der viel höheren zyklischen Schwankungen größere Unterschiede zuzulassen.

Im Falle zylinderselektiver Klopfregelung ist zusätzlich die Analyse der Zündzeitpunkte notwendig, um unnötige Fehlermeldungen zu vermeiden.

28. Kontrolle des Reibmitteldruckes

Der effektive Mitteldruck des Motors kann aus den Leistungsdaten der Belastungseinheit und dem Hubvolumen berechnet werden. Der innere effektive Mitteldruck kann ausgehend von der Druckindizierung ebenfalls sehr genau aufintegriert werden. Der Unterschied zwischen diesen Werten ist der durch mechanische Verluste auftretende Reibmitteldruck. Dieser kann als Polynomansatz sehr brauchbar über der Motordrehzahl abgeschätzt werden.

Stimmt der berechnete Reibmitteldruck nicht mit dem Modellwert überein, so liegen Fehler entweder in einem der Indizierquarze oder in der Kraftmessdose zur Drehmomentenmessung vor.

6.3.4.6 Referenzpunkterkennung bei 2000 Umdrehungen/min

29. Schleppbetrieb

Anhand von Drehmoment und Kraftstoffverbrauch wird zunächst der Schleppbetrieb automatisch erkannt. Für die Drosselklappenwinkel „geschlossen“ und „vollständig geöffnet“ werden die Werte für die Drücke im Saugrohr und im Abgassystem mit historischen Daten verglichen.

30. Gefeuerter Betrieb

Bei einer Vielzahl von Vermessungen wird der Betriebspunkt 2000 Umdrehungen / 2 bar effektiver Mitteldruck angefahren.

Auch dieser Punkt wird automatisch als Referenzpunkt erkannt. Ähnlich wie im Schleppbetrieb finden Vergleiche zu historischen Daten statt. Neben den Drücken können zusätzlich der O_2 und der CO_2 -Gehalt im Abgas sowie der effektive Wirkungsgrad kontrolliert werden.

6.3.4.7 Sonstige Überprüfungen

31. Abgleich mit ECU-Messgrößen

Die ECU stellt einen großen Umfang von Mess- oder Modelldaten bereit. Aufgrund der geringen Standardisierung zwischen den Herstellern von Motorsteuergeräten kann aber nur ein kleiner Teil dieser Größen sinnvoll genutzt werden. Dies sind im Wesentlichen Werte für den Kraftstoffverbrauch, die Luftmasse und das Lambda. Die Werte liegen entweder als relative Größen vor, oder mit unterschiedlichen Einheiten behaftet. Der größte Aufwand ist hierbei in der Tat die richtige Umrechnung der ECU-Größen in eine Form, dass externe Messgrößen damit verglichen werden können.

Damit liegen dann aber gute Vergleichsgrößen vor, die auch für die Fehlerisolation sehr wertvoll sind.

32. Sollwertüberprüfung

Es findet eine Sollwertkontrolle von Drehzahl, Drehmoment und Pedalwert Alfa statt. Diese Kontrolle wird zwar meist schon im Prüfstandsrechner durchgeführt, doch fehlt

bislang die Kommunikationsmöglichkeit, um die Ergebnisse dieser Prüfung auch für die Fehlerisolation zu nutzen. Außerdem sollten alle Fehlermeldungen möglichst auf einer Oberfläche gebündelt werden, weswegen die Überprüfung doppelt ausgeführt wird.

33. Suche nach Messwertausfall

Bei Sensorausfall oder Kabelbruch kann es zur Anzeige von nicht interpretierbaren Werten kommen, die sich durch Sonderzeichen wie "*" oder "-" bemerkbar machen. Diese Ereignisse werden unmittelbar auf dem Bildschirm dargestellt.

34. Grenzwertüberwachung

Für die wesentlichen Motorvarianten Otto/Diesel und Lademotor/Saugmotor sind in einer Datenbank Grenzwerte für alle wesentlichen Größen abgespeichert. Damit ist es möglich, eine Reihe von Sensorausfällen oder falsche Messbereiche zu detektieren.

35. Öldruckkontrolle

Der Öldruck wird an den meisten Prüfständen grenzwertüberwacht, d.h. unter beispielsweise 0.5 bar erfolgt ein automatisches Herunterfahren des Prüfstandes. Bei hohen Drehzahlen reichen diese 0.5 bar hingegen kaum aus, um den Motor dauerhaft betreiben zu können.

Der Öldruck kann mittels eines Polynoms mit der Kolbengeschwindigkeit als Eingangsgröße abgeschätzt werden. Für betriebswarme Motoren lässt sich somit ein drohender Motorschaden oder ein defekter Sensor deutlich früher detektieren als mittels bekannter Grenzwertüberwachung. Auch Ölverdünnung nach Eintrag von Kühlwasser oder Kraftstoff kann mit dieser Methode erkannt werden.

36. Kraftstoffdichte und Zusammensetzung

Die Kraftstoffdichte, manchmal Nebenprodukt der Kraftstoffverbrauchsmessung, wird mit den gesammelten Daten für den jeweiligen Kraftstofftyp abgeglichen. Mischkraftstoffe oder falsche Parametrierung können damit aufgedeckt werden.

Neben der Kraftstoffdichte wird auch noch die Zusammensetzung des Kraftstoffs geprüft, ob sie in sich stimmig ist, und ob sie zu dem angegebenen Motortyp passt. Hierzu sind Erfahrungswerte im Hintergrund abgelegt.

37. Wenn auch die Luftmasse ohne größere Parametrierung nicht genau berechnet werden kann, so kann doch eine sehr genaue Abschätzung erfolgen, wie viel Luft der Motor maximal bei einem gemessenen Saugrohrdruck und einer gemessenen Saugrohrtemperatur umsetzen kann. Es handelt sich hierbei um eine physikalisch basierte Maximalwertabschätzung.

6.4 Fehlerisolation (FI Fault Isolation)

Die vorliegenden Fehlerdetektionsmethoden basieren auf vier Säulen.

Die Erste ist die schon oft verwendete Grenzwertüberwachung oder Monitoring. Hierbei werden für verschiedene Motortypen Grenzwerte der gängigen Messgrößen festgelegt. Werden diese im laufenden Betrieb überschritten, so erfolgt eine Fehlermeldung.

Die zweite Säule bilden Ungleichungen, die einfache Zusammenhänge zwischen verschiedenen Drücken oder Temperaturen ermöglichen. Es handelt sich dabei um direkte Vergleiche zwischen verschiedenen Messgrößen, für die eine definierte größer/kleiner-Beziehung definiert werden kann.

Als Drittes werden Gleichungssysteme verwendet, die bestimmte Teilprozesse oder grundsätzliche Eigenschaften des Systems Motor-Bremse wiedergeben. Da die Gleichungssysteme aufgrund von Vereinfachungen in der Modellbildung nicht ganz fehlerfrei sind, ist ein individuelles Toleranzband notwendig, das zur Ausgabe von Fehlermeldungen überschritten werden muss.

Die vierte Säule besteht aus Motor-Teilmodellen, die anhand von Vorwissen in Datenablagen gespeichert und online mit dem Systemverhalten verglichen werden können (z.B. Kennfelder von Turboladern oder empirische Modelle für Abgaskonzentrationen).

Allen Methoden gemeinsam ist die Generierung von Fehlersymptomen. Dies sind z.B. binäre Ergebnisse, ob die eine oder andere Gleichung (Ungleichung) falsch ist oder nicht. Bei den physikalischen Modellen (z.B. Bilanzgleichungen) liegt als Symptom häufig auch noch ein durch Vorzeichen und Größe definiertes Residuum vor. Bei den Wirkungsgradbetrachtungen oder den Berechnungen von Systemparametern (Reibung) sind Veränderungen dieser Größen selbst als Symptom aufzufassen.

Die Fehlerisolation hat nun zur Aufgabe, die verschiedenen in den Methoden anfallenden Fehlersymptome zu analysieren und die eigentlichen Ursachen dieser Symptome zu finden.

Die Voraussetzungen hierfür sind eine möglichst einfache und schnelle Rechnung, eine hohe Flexibilität bei unterschiedlichsten Kombinationen von Analysemethoden und eine möglichst gute Isolation der fehlerhaften Kanäle. Die gängigsten Methoden sollen an dieser Stelle kurz erörtert werden, um deren Eignung für den vorliegenden Fall zu klären. Isermann [20] teilt die Mechanismen der Fehlerisolation in die Felder Inferenz- oder Klassifikationsmechanismen ein. Beide Varianten sollen hier kurz vorgestellt, ihre Eignung untersucht und bei Bedarf neue Ansätze gefunden werden.

6.4.1 Inferenzverfahren

Bei den Inferenzverfahren wird das Wissen ausgenutzt, welche Fehler die Ursache verschiedener Fehlersymptome sind. Dieses Wissen wird in der Beziehung

Fehler → Ereignis → Symptom

in Form von "Fehler-Symptom-Bäumen" abgelegt. In Abbildung 6.37 ist ein solcher Baum exemplarisch abgebildet. Die erste Schicht Knoten repräsentiert die Fehler, die als eigentliche Ursachen der Unstimmigkeiten in Frage kommen. Die Knoten mit Zugangs- und Abgangskanten stellen die Ereignisse E dar, die sich in Abhängigkeit verschiedener Fehler F ergeben. Die letzte Schicht sind die Symptome oder Merkmale, in denen sich die Fehler letztlich bemerkbar machen. Die gerichteten Kanten stellen die kausale Wirkkette dar.

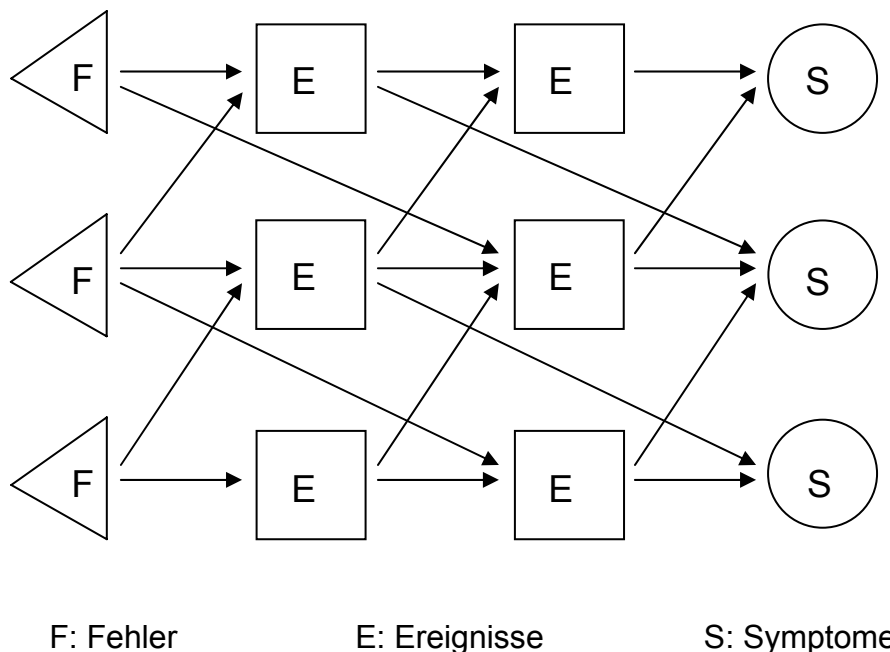


Abbildung 6.37: Beispiel eines kausalen Netzes mit verschiedenen Ebenen [20]

Von der Grundidee entspricht diese Vorgehensweise prinzipiell genau der Zielsetzung, da vieles an Expertenwissen, also das Wissen des erfahrenen Prüfstandsfahrers, in der Software abgebildet wird. Es kann somit als Hilfestellung im Fehlerfall ausgegeben werden.

Beispiel für einen Fehler F:

An einem Dieselmotor ist eine Einspritzdüse derart defekt, dass Kraftstoff in größeren Mengen direkt auf den Kolbenboden gespritzt wird.

Für diesen Fehler lassen sich eine Reihe von Zwischenereignissen E definieren, die im Einzelfall auftreten können. Diese sind z.B.

- verschleppte Verbrennung
- Überhitzung des Kolbens
- partieller Zusammenbruch des Ölfilms

Die Symptome S, an denen die Problematik erkannt werden könnte, sind noch zahlreicher und beinhalten z.B.

- akustische Auffälligkeiten
- erhöhte HC-Emission
- auffallend hoher Reibmitteldruck
- unterschiedliche Verbrennungsschwerpunkte und Zündverzögerungen
- ansteigende Öl- oder Kühlmitteltemperatur

Das erste Symptom ist noch heuristischer Natur, d.h. auch der Prüfstandsfahrer kann mit seinen Sinnen manche Probleme erkennen, ohne auf Messdaten angewiesen zu sein. Die letzteren Symptome sind analytischer Natur, eignen sich also besser für eine automatisierte Fehlerisolation.

Die Aufgabe besteht nun darin, anhand der aufgetretenen Symptome schrittweise auf die wahren Fehler zurückzuschließen. Im einfachsten Fall werden jeweils an den Knotenabgangskanten logische Verknüpfungen als Diagnoseregeln eingeführt, die eine Entscheidung mittels

WENN (Bedingung) **DANN** (Schlussfolgerung)

ermöglichen. Etwas aufwändiger, jedoch besser bewährt haben sich nach [19, 20] Fuzzy-Logik Entscheidungsstrukturen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Systematik empfiehlt es sich, das Netz in Form äquivalenter strukturierter Graphen (sog. Fehlerbäume) darzustellen. Eine Möglichkeit der Darstellung ist die, dass jeder Fehler die Wurzel eines Baumes ist, die Gabelungen die Ereignisse und die Symptome die Blätter repräsentieren. Diese Auftragsart ist in der folgenden Grafik dargestellt.

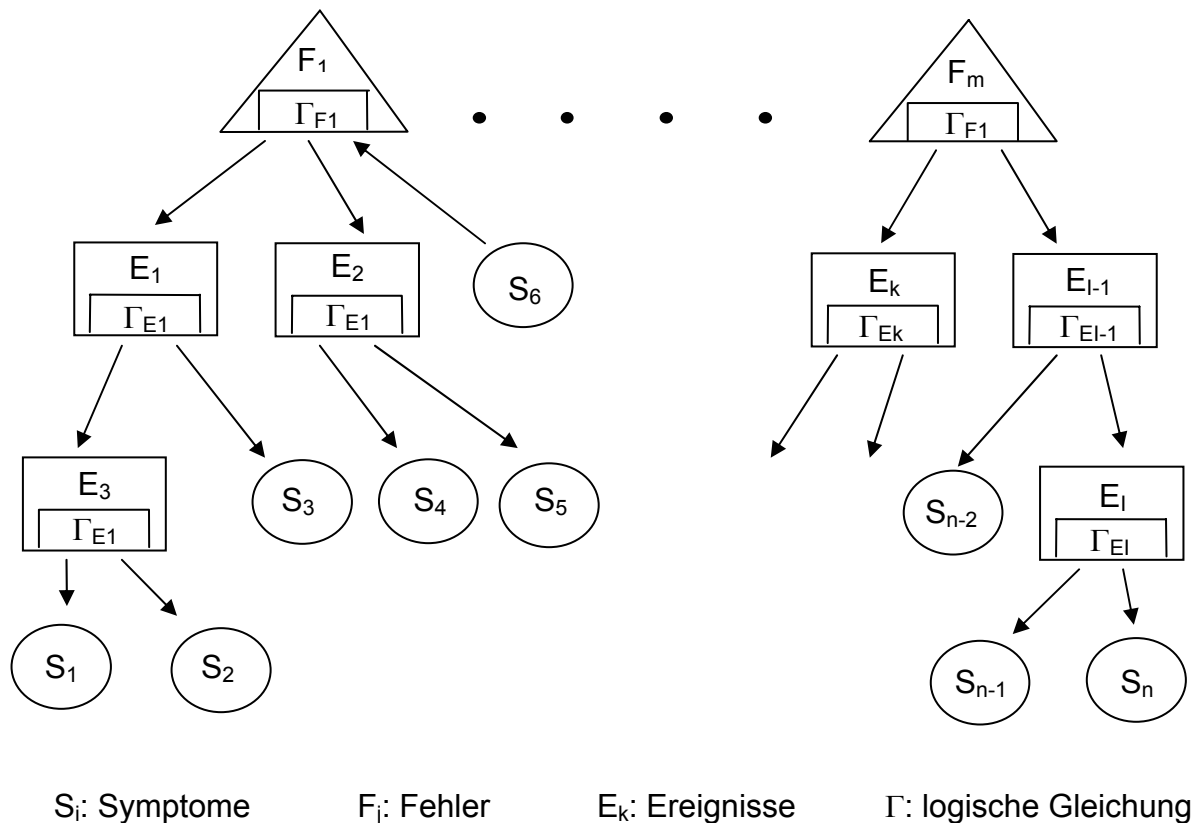


Abbildung 6.38: Fehler-Symptom-Bäume [20]

Bewertung:

Vorteilhaft ist, dass eine große Menge von Expertenwissen in der Struktur der Fehlerbäume abgelegt werden kann.

Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, dass durch die ständig wechselnden Motorkonfigurationen und Messkanalzusammenstellungen Teile der Fehlerbäume wegfallen oder nicht zu verarbeiten sind. In der Literatur sind stets Beispiele aufgeführt, die in ihrer Struktur festliegen und auch von der Sensorik keinen Änderungen unterliegen.

Ein weiterer Nachteil ist darin zu sehen, dass als Informationsquelle gerade einmal ein Satz von 30-50 verwertbaren Größen vorliegt.

Fasst man dagegen die an Motorprüfständen auftretenden Fehlermöglichkeiten zusammen, so kommen unter Berücksichtigung von Bauteilschäden, Elektrofehlern, Sensorausfällen, Bedienungsfehlern sowie internen Schäden in den Sondermessgeräten eine vielfach höhere Anzahl potentieller Fehlerursachen zusammen. Alleine das Erstellen der Fehlerbäume stellt damit eine kaum zu realisierende Tätigkeit dar. Des Weiteren ist die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Fehlerisolation in Anbetracht des Verhältnisses aus Eingangsgrößen und Fehlern nicht sehr viel versprechend.

Dies und auch die Überlegung, wie die Erweiterung und Pflege der Diagnosemethoden und Fehlerbäume organisiert werden soll, lassen diese Möglichkeit für den Anwendungsfall unrealistisch erscheinen.

Methode	Residuum
Sauerstoffbilanz Gesamtmotor (Abgase vor Kat)	1
Kohlenstoffbilanz Gesamtmotor (Abgase vor Kat)	3
Sauerstoffbilanz Gesamtmotor (Abgase nach Kat)	1
Kohlenstoffbilanz Gesamtmotor (Abgase nach Kat)	3
Lambda Luft Kraftstoff und Lambda Abgas (nach Kat)	-3
Lambda Luft Kraftstoff und Lambda Abgas (vor Kat)	0
Lambda Luft Kraftstoff (Waage) und Sonde	0
Lambda Sonde und Lambda Abgas vor Kat	0
Lambda Sonde und Lambda Abgas nach Kat	0
Vergleich von 2 Punkt und Breitbandsonde	0
Energiebilanz Gesamtmotor	-2
Abschätzung der Abgastemperatur	3
Abschätzung des maximalen Wirkungsgrades	0
Abschätzung des minimalen Wirkungsgrades	0
Lambda Abgas vor und nach Abgasnachbehandlung	0
Abschätzung von CO über Lambda	2
Abschätzung des NOx über Lambda	2
Abschätzung der FSN über Lambda	2
Sauerstoff aus Lambdasignal (Vergleich Abgas vor Kat)	0
Sauerstoff aus Lambdasignal (Vergleich Abgas nach Kat)	0
...	...

Abbildung 6.40: Muster eines fehlerhaften Eingangskanals (Ausschnitt)

Für die vorliegenden Diagnosemethoden konnte gezeigt werden, dass auch je nach Fehlergröße unterschiedliche Muster abgespeichert werden müssen, da sich die Anzahl und die Ausprägung der Residuen bei unterschiedlicher Fehlergröße ändern. Dasselbe gilt auch für unterschiedliche Lasten, da nicht alle Methoden im gesamten Kennfeld aktiv sind.

Im Gegensatz zu den Inferenzverfahren lassen sich die Muster je nach Messkanalausstattung des Prüfstands sehr einfach "zurechtschneiden", so dass die Methodik bei beliebigen Messkanalkombinationen funktioniert. Sehr wenige Messkanäle oder sehr kleine Fehler führen bei den hier erzeugten Mustern zu sehr geringer Belegungsdichte der Vektoren. Aus diesem Grunde wird im vorliegenden Prototyp für die Mustererkennung zunächst eine Informationskonzentration vorgenommen. Hierzu werden die Teile der Muster entfernt, die den nicht aktivierten Methoden vorbehalten sind. Je nach Messkanalkombination sind ja nur kleine Teile der Diagnosemethoden aktiv. Entsprechend können von diesen Methoden auch keine Merkmale generiert werden. In einem zweiten Schritt können alle Zellen ungleich Null herausgestrichen werden, und zwar gleichwertig in der Mustervorlage, als auch in dem aktuellen Ist-Muster. So bleibt jeweils für das erzeugte als auch von den abgespeicherten Mustern nur eine Zahlenreihe von beispielhaft 10-20 Zahlen übrig.

Als Ähnlichkeitsmaß zwischen den beiden Zahlenreihen kommen verschiedene Kenngrößen in Betracht, so z.B. das Skalarprodukt

$$C = x \cdot y = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i, \quad [70]$$

der Winkel zwischen den beiden Vektoren

$$\cos \Theta = \frac{x \cdot y}{|x| \cdot |y|}, \quad [71]$$

oder der Euklidische Abstand

$$d_e(x, y) = |x - y| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [72]$$

In der Literatur finden sich einige weitere Methoden zur Ähnlichkeitsbewertung [40], die aber an dieser Stelle nicht weiter von Interesse sind.

Bewertung:

Der Rechenaufwand und die Handhabbarkeit der Muster bei unterschiedlicher Messkanalkonfiguration ist auf den ersten Blick sehr viel versprechend.

Letztlich scheitert der Einsatz dieser Methode daran, dass die Erweiterbarkeit um neue Methoden und Messkanäle sehr kompliziert ist. Ein Muster muss ja zunächst einmal erlernt und gespeichert werden, bevor es wieder erkannt werden kann. Mit jeder neuen Messgröße und jeder neuen Methode muss also ein zunächst fehlerfreier Datensatz erzeugt werden, der die Generierung des nun zu ermittelnden Fehlers ermöglicht. Dieses neu erzeugte Muster ist für verschiedene Lasten zu erstellen und mit den bereits vorliegenden Mustern zu verknüpfen.

Es hat sich zudem in Versuchen und synthetischen Messdaten gezeigt, dass diese Art der Fehlerisolation angewandt auf unterschiedlichen Prüfständen nicht sinnvoll ist. Gerade die von Prüfstand zu Prüfstand sehr unterschiedliche Grundkalibrierung (Residuen im frisch kalibrierten "Normzustand"), und die je nach Last und Motortyp sehr unterschiedliche Ausprägung der Muster führen zu einer Reihe von Fehlmeldungen, die in dieser Häufigkeit inakzeptabel sind. Die bisherige Betrachtung legt den Schluss nahe, eigene Verfahren für den Spezialfall Motorenprüfstand zu generieren.

Bis hierher können folgende Punkte als Randbedingung festgehalten werden:

Eine Isolierung der Fehler in einer Weise, dass der Prüfstandsfahrer zu konkreten Reparaturen an einem bestimmten Messgerät aufgerufen wird, erscheint nicht realistisch

Vielmehr sollte der Prüfstandsfahrer darauf hingewiesen werden, welche der Kanäle nicht stimmig zueinander sind oder welche Schlüsselgrößen gerade besonders auffällig sind.

6.4.3 Logisch-wahrscheinlichkeitsbasiertes Verfahren

Die bislang bekannt analysierten Verfahren haben den Vorteil, in starren Strukturen und bekannten Systemen gut zu funktionieren. Bei ungenügender Systeminformation oder geringer Anzahl von Eingangsinformationen aber erbringen sie weniger brauchbare Ergebnisse. Auch der Erweiterbarkeit dieser Methoden sind enge Grenzen gesetzt, da das nachträgliche Modifizieren von Fehlerbäumen oder Mustern nur schwer zu realisieren ist.

Nun sollen in einem hochgradig flexiblen Verfahren all die Fragestellungen genutzt werden, die auch ein Ingenieur bei analytischer Vorgehensweise nutzen würde. Dies sind unter anderem:

- Welche Eingangsgrößen liegen in den fehlerhaften Methoden vor?
- Welchen Einfluss haben diese Größen innerhalb dieser Methoden?
- Wie müssten die Eingangsgrößen beschaffen sein, damit kein Fehler auftritt?
- Wie oft ist eine bestimmte Größe innerhalb der fehlerhaften Methoden verwendet worden?
- Wie oft ist eine bestimmte Größe in den fehlerfreien, aber benutzten Methoden aufgetreten?

Diese Fragestellungen können unabhängig davon gestellt werden, welche Messkanäle bzw. welche Methoden gerade im aktuellen Datensatz vorliegen. Es liegt folglich uneingeschränkte Flexibilität vor.

Außerdem wird angenommen, dass nur Messgerätefehler oder Sensorfehler auftreten. Sieht man sich die Liste der 17 störendsten Fehler an (Abbildung 2.1), so ist dieser Schluss nahe liegend. Die Thematik vereinfacht sich erheblich, da keine Rücksicht mehr auf die vielen Elektro-, Bedienungs-, und Bauteilfehler mehr genommen werden muss.

Im Zweifelsfall obliegt es dann dem Prüfstandsfahrer, aus dem Isolationsergebnis „pmi, Md oder Verbrauch fehlerhaft“ auf eine defekte Indizierung oder wahlweise eine defekte Kraftmessdose zu schließen. Dies ist aber recht schnell realisierbar, wenn die entsprechenden Hinweise dazu vorliegen.

6.4.3.1 Abschätzung der Fehleranzahl

Vorgreifend soll hier zunächst vorgestellt werden, wie die minimale Anzahl der Ursachen abgeschätzt werden kann. Daraus resultiert dann eine etwas unterschiedliche Isolationsstrategie.

Voraussetzung sind ausschließlich sowohl Fehler in den Messgeräten als auch eine minimale Anzahl von Ursachen.

Im Programm wird für jeden Messkanal und jede Methode notiert, ob ein Kanal verwandt wurde, und ob er in fehlerhaften Methoden beteiligt war. Aus diesem

Wissen kann eine Aufstellung gebildet werden, die jeder fehlerhaften Methode die jeweils verwendeten Eingangsgrößen gegenüberstellt.

Nun wird die Messgröße herausgesucht, die am häufigsten in den fehlerhaften Methoden vorkommt. Diese wird zunächst als erste und wahrscheinlichste Fehlerursache deklariert. Die betroffenen Methoden werden aus der Liste der fehlerhaften Methoden gestrichen. Es verbleiben also die Modelle, bei denen die Größe nicht eingegangen ist.

Da eine minimale Anzahl von Ursachen unterstellt wird, wird auch aus diesen verbliebenen Methoden die am meisten verwendete Messgröße herausgesucht. Dies ist die vermeintlich zweite Fehlerursache. Das Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis keine fehlerhafte Methode mehr vorliegt.

fehlerhafte Methoden M_i , beteiligte Kanäle K_i

M 1	M2	M3	M4	M5	M6	Häufigkeit:	
K1	K1	K1	K1	K5	K4	K1: 4	} Methoden mit K1 aus- sortieren
K2	K3	K3		K6	K5	K2: 1	
	K4	K6				K3: 2	
						K4: 2	
						K5: 2	
						K6: 2	
fallen weg							
						Häufigkeit:	
						K4: 1	} Methoden mit K5 aus- sortieren
						K5: 2	
						K6: 1	
fallen weg							

Im vorliegenden Fall müssen also mindestens zwei unterschiedliche Fehlerursachen vorliegen. Je nachdem, ob nur eine oder auch mehrere Größen für den Fehler verantwortlich sind, kommen teilweise unterschiedliche Isolationsstrategien zum Einsatz.

6.4.3.2 Isolierung durch Schwellenwertbetrachtung

Im Motorbetrieb mit all seinen Ungenauigkeiten und zyklischen Schwankungen werden die meisten Modelle ein Residuum ausgeben, d.h. der Erwartungswert wird niemals exakt getroffen. Aus diesem Grund ist für solche Modelle eine Toleranzschwelle definiert. Sie gibt an, wie groß die Abweichung zwischen den Schlüsselgrößen (z.B. Vergleich Mess- und Rechenwert) sein darf.

$$(\text{Rechenwert} - \text{Messwert}) / \text{Rechenwert} = \pm \text{Toleranzschwelle} [\%] \quad [73]$$

Umgekehrt kann rückwärtig berechnet werden, wie die Messdaten aussehen dürften, um gerade die Fehlergrenze zu erreichen.

$$\text{Min/Maxwert} = \text{Rechenwert} * (1 \pm \text{Toleranzschwelle}) \quad [74]$$

Da jeweils eine Abweichung nach oben und nach unten möglich ist, lassen sich für jede Eingangsgröße (Messwert) zwei Werte berechnen, die diese Bedingung erfüllen. Im Falle nicht verletzter Modelle liegt der betrachtete Messwert natürlich zwischen den Minimal- und Maximalwerten. Im folgenden Beispiel sind die Minimal- und Maximalwerte von 10 verschiedenen Methoden für einen Lastpunkt bei fehlerfreien Messdaten dargestellt. Die Grenzwerte beziehen sich in diesem Beispiel nur auf die Luftmasse, allerdings ließe sich für jede Messgröße ein solches Bild erzeugen.

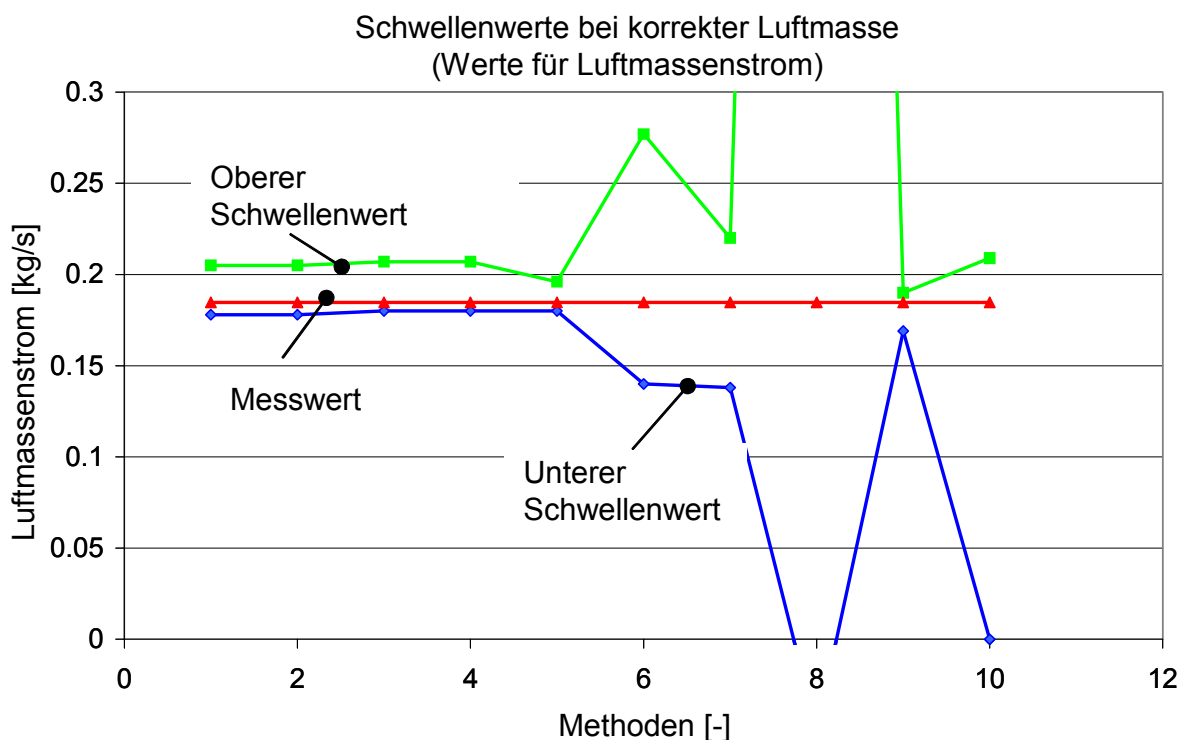


Abbildung 6.41: Schwellenwerte bei fehlerfreien Modellen

Der Messwert steht mit keinem Grenzwert im Konflikt, die Fehlerschwellen werden für alle Modelle eingehalten, somit wird auch kein Fehler angezeigt. Es ist weiterhin zu erkennen, dass alle Modelle verschieden gut eine Aussage über die zu erwartende Luftmasse treffen können. Bei Modellen, in denen die Luftmasse nur sehr gering eingeht, sind die rückwärtig berechneten Größen sehr weit vom richtigen Wert entfernt (Modell 8). Umgekehrt können andere Modelle sehr genau die richtige Luftmasse vorhersagen (Modell 5).

Wenn ein Modell nicht erfüllt wird, so liegt mindestens eine Eingangsgröße über dem berechneten Maximalwert oder unterhalb des berechneten Minimalwertes.

Anhand der Auswirkungen eines falschen Luftmassensignals soll der Zusammenhang verdeutlicht werden. (In diesem Fall eine Reduzierung der Luftmasse um 15%). Die Grenzwerte für die Luftmasse haben sich natürlich nicht geändert, da in deren Berechnung die Luftmasse selbst ja nicht eingeht. Es ergibt sich folgendes Bild:

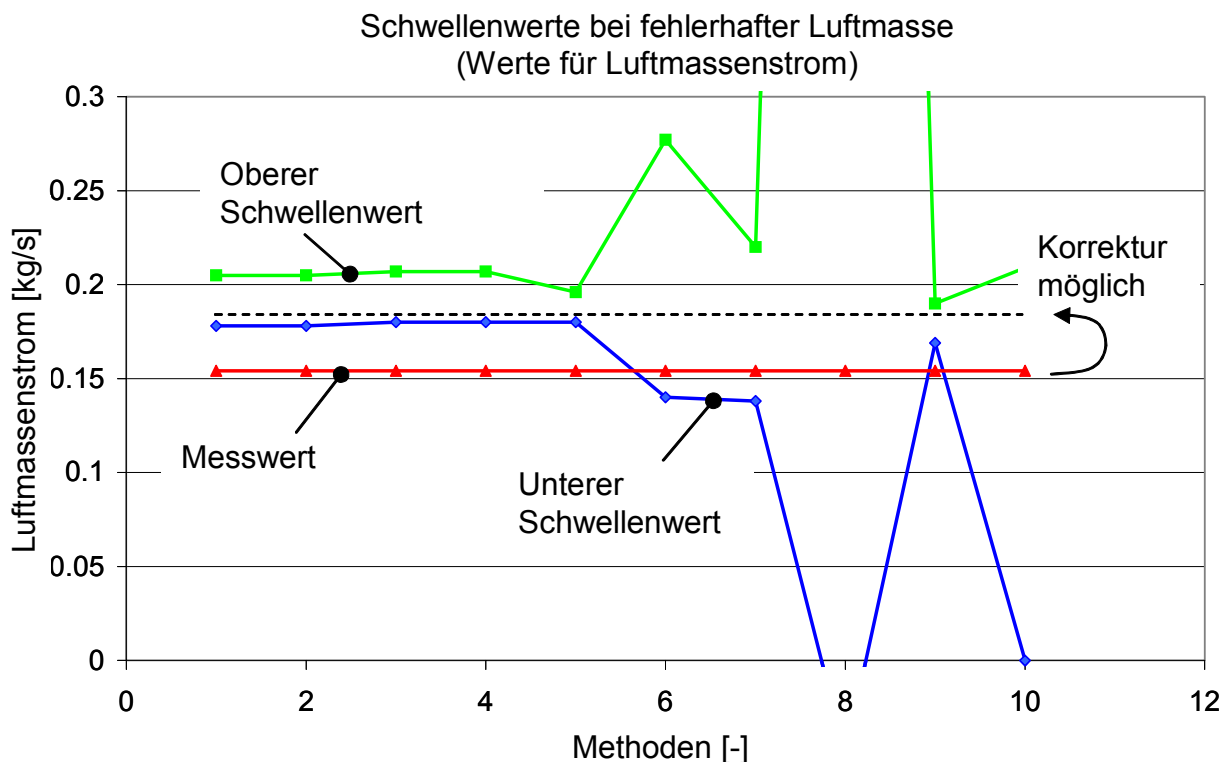


Abbildung 6.42: Schwellenwerte bei fehlerhaften Modellen

Modelle 1-5 und 9 liefern Fehlermeldungen, da der Toleranzbereich mit den vorhandenen Messgrößen nicht haltbar ist. Allerdings ist für die Luftmasse ein Wert möglich, der alle Modelle wieder in die erlaubten Schwellenwerte zurückbringt. Für andere Messgrößen, die in dieselben Modelle eingehen können, soll ebenfalls dieses Diagramm betrachtet werden.

Es ist schließlich denkbar, dass auch durch eine Korrektur von Kraftstoffverbrauch, Abgasemissionen oder Drehzahl die Modelle fehlerfrei werden können. Es zeigt sich

aber, dass dies in den meisten Fällen nicht so ist. Für diese Größen, die nicht Ursache des Fehlers sind, kann durch keine Veränderung des Wertes ein fehlerfreies Modellsystem erzeugt werden. Es gibt stets Widersprüche zwischen den Schwellenwerten, so dass als wahre Fehlerquelle nur die Luftmasse übrig bleibt.

Auf dem folgenden Bild sind die Grenzwerte aller Methoden für den Kraftstoffverbrauch bei gleicher falscher Luftmasse dargestellt. Einige Methoden sind verletzt, d.h. der Messwert liegt nicht innerhalb der Grenzwerte. Mit einer Korrektur des Messwertes lassen sich die Verhältnisse für einige Methoden verbessern, es ist aber mit keinem Verbrauchssignal möglich, alle Methoden fehlerfrei zu machen.

Der Schluss daraus muss sein, dass der Verbrauch alleine nicht die Ursache dieser Unstimmigkeiten sein kann.

Schwellenwerte bei fehlerhafter Luftmasse
(Werte für Kraftstoffverbrauch)

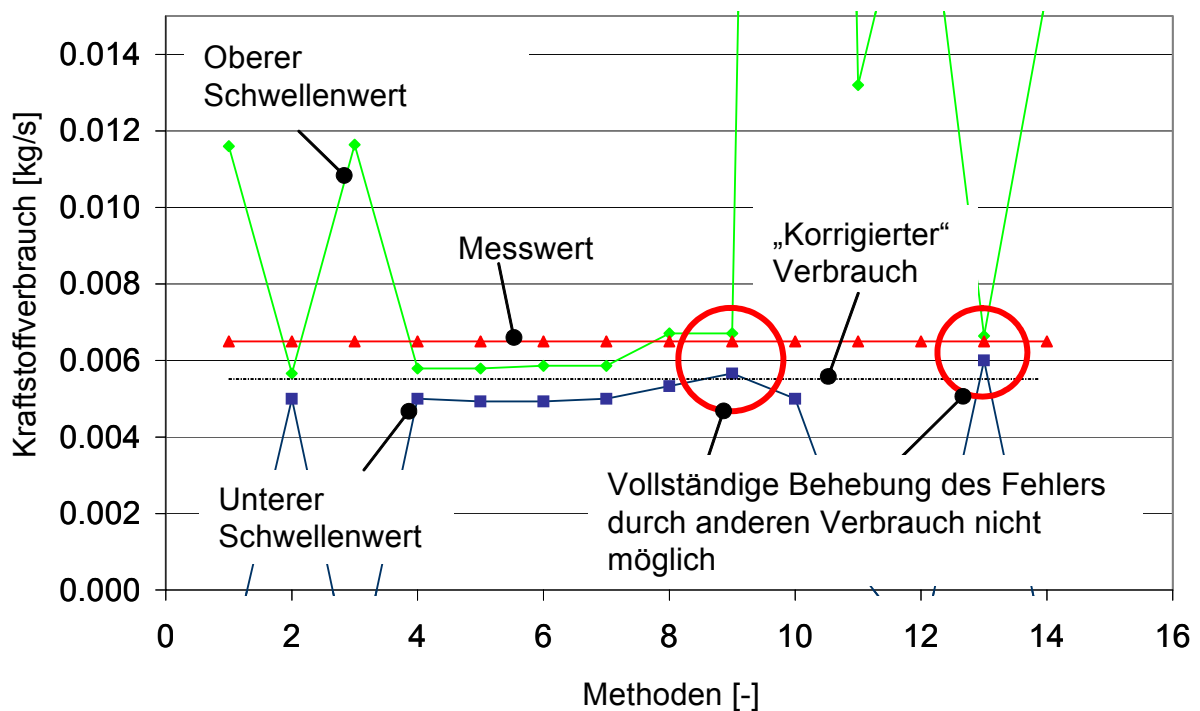


Abbildung 6.43: Schwellenwerte bei fehlerhaften Modellen

Bleibt man bei der Annahme, dass eine minimale Anzahl von Größen für die Unstimmigkeiten verantwortlich ist, so kann der Verbrauch nicht Ursache des Fehlers sein.

Ein ähnliches Bild zeigt sich für alle anderen Messgrößen, hier z.B. noch CO_2 . Eine Änderung der CO_2 -Konzentration kann ebenfalls nicht dazu führen, dass alle Modelle fehlerfrei werden. Diese Größe kann folglich als Fehlerursache auch nahezu ausgeschlossen werden.

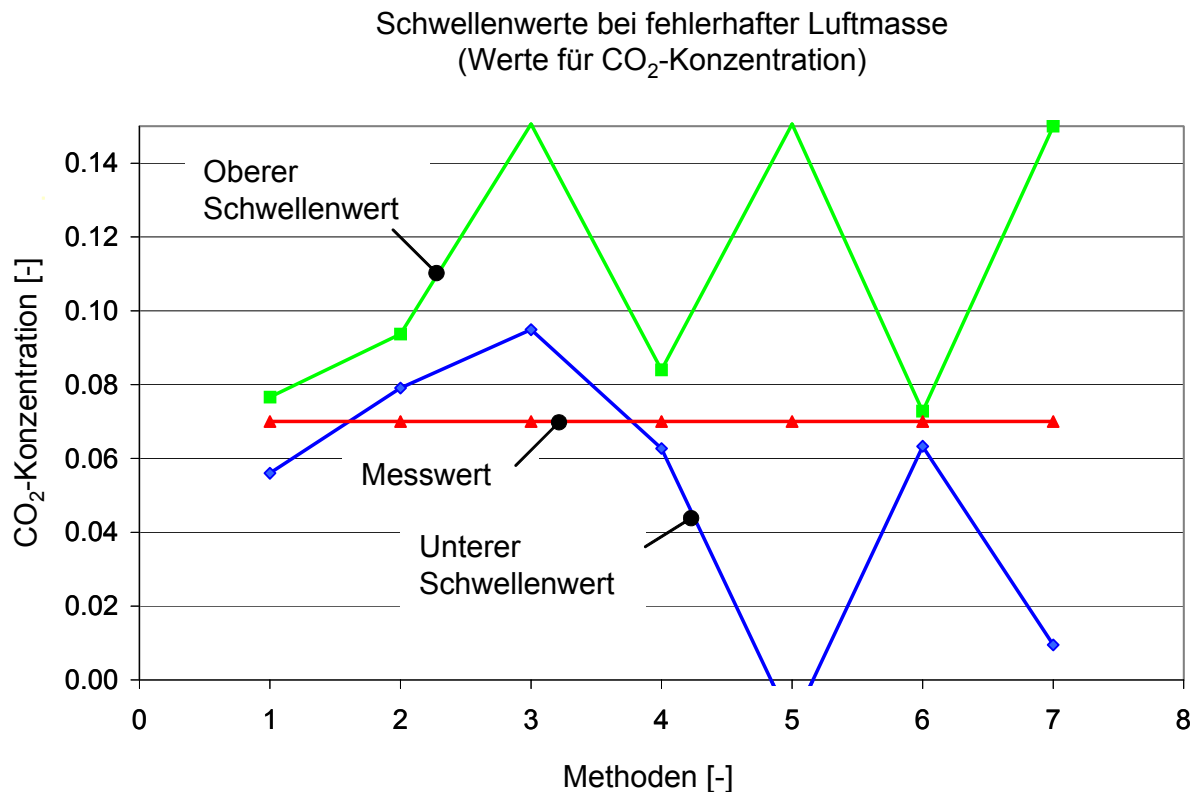


Abbildung 6.44: Schwellenwerte bei fehlerhaften Modellen

In Summe kann aus den vorliegenden Bildern geschlossen werden, dass der Luftmassenstrom Ursache der fehlerhaften Modelle sein muss. Es kann weiterhin angegeben werden, mit welchem Luftmassenwert die Modelle fehlerfrei werden, d.h. der Wert kann korrigiert werden.

Nun stellt sich noch die Frage, wie die bislang aufgrund einer visuellen Betrachtung ermittelte Schlussfolgerung analytisch mit Hilfe des Rechners umgesetzt werden kann.

Ziel ist ein Bewertungsschlüssel, der bei großer Fehlerwahrscheinlichkeit "p" den Wert 1 erreicht, bei sehr kleiner Wahrscheinlichkeit den Wert 0.1 annimmt. Dieser Wert, der einer echten Wahrscheinlichkeit sehr ähnlich ist, soll jedem potentiell fehlerhaften Kanal zugewiesen werden. Der Wert von 0 wird vermieden, da die Information, dass der Kanal potentiell beteiligt ist, nicht verloren gehen soll. Des Weiteren existiert auch noch die Annahme über eine minimale Fehleranzahl, weswegen keine 100%ig sichere Aussage generiert werden kann.

Es werden folgende Fallunterscheidungen getroffen:

- Wenn der Messwert zwischen Minimal- und Maximalwert liegt, dann ist die Fehlerwahrscheinlichkeit sehr klein ($p_1 = 0.1$).
- Wenn der Messwert kleiner als der Maximalwert ist, aber kein Minimalwert vorhanden ist, dann spricht das für unsichere Modelle und damit für eine größere Fehlerwahrscheinlichkeit. Ein Fehler kann allerdings noch nicht damit nachgewiesen werden. ($p_1 = 0.5$)
- Das gleiche gilt für den Fall, dass der Messwert größer als der Minimalwert ist, jedoch kein Maximalwert berechnet werden kann.
- Wenn der Minimalwert größer ist als der Maximalwert, dann kann der Kanal alleine nicht Ursache der Unstimmigkeiten sein. ($p=0.1$)
- Der Minimalwert ist kleiner als der Maximalwert, der Messwert liegt aber nicht dazwischen. Dies deutet auf einen direkten Fehler im betreffenden Kanal hin. ($p_1=1$)

Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens steigt mit der Anzahl der aktiven Methoden. Stehen für eine Messgröße nicht viele oder nur eine Methode zur Verfügung, so funktioniert die Isolationsstrategie zwar prinzipiell genauso, jedoch sind die Isolationsmöglichkeiten dann aufgrund der fehlenden Eindeutigkeit sehr beschränkt. Es existieren dann meist mehrere Möglichkeiten, wie die Modelle in den fehlerfreien Zustand überführt werden können.

Im Falle mehrerer Ungenauigkeiten, d.h. mindestens zwei fehlerhaften Messgrößen, kann die oben beschriebene Fehlerisolation ebenfalls nicht mehr richtig arbeiten. Als Grund sind die Wechselwirkungen der Messgrößen bei der Berechnung der Schwellenwerte zu sehen. Die Methoden, in die beide fehlerhaften Größen eingehen, lassen keine eindeutige Berechnung der Schwellenwerte mehr zu.

Es soll jedoch festgehalten werden, dass die meisten Fehlerisolationsverfahren in diesem Zusammenhang versagen. Ansonsten müssten die Fehler mit allen Wechselwirkungen als Expertenwissen (Muster, Fehlerbäume) abgelegt werden, was bei einem solch komplexen und variablen System Prüfstand nicht in einem sinnvollen Zeitrahmen umzusetzen ist.

Aus diesem Grunde wird die vorgestellte Methode nur dann verwandt, wenn die Unstimmigkeiten voraussichtlich auf nur eine fehlerhafte Größe zurückgeführt werden können (vgl. 6.4.3.1). Gleichzeitig, oder bei mehreren Fehlern ersatzweise, wird eine wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerisolation durchgeführt.

6.4.3.3 Isolation durch Wahrscheinlichkeitsbetrachtung

Annahme ist zunächst, dass eine minimale Anzahl von Ursachen zu den fehlerhaften Modellen führt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Kanal, Ursache der Unstimmigkeiten innerhalb der fehlerhaften Modelle zu sein, hängt sicherlich von der Häufigkeit der Größe innerhalb dieser Methoden ab. Es kann eine Kennzahl p_2 definiert werden, die einer Wahrscheinlichkeit zumindest sehr ähnlich ist.

$$p_2 = \frac{\text{Häufigkeit einer Messgröße in fehlerhaften Modellen}}{\text{Anzahl der fehlerhaften Modelle}} \quad [75]$$

Mittels des Wissens um die Einflüsse der Einzelgrößen innerhalb der Methoden kann die Aussagekraft dieses Faktors noch deutlich verbessert werden. Grundlage bildet eine Gewichtung der Eingangsgrößen zwischen 1 und 3. Eine 1 bedeutet nur geringen Einfluss, eine 2 einen mittleren, eine 3 einen großen Einfluss. Dieser Gewichtung wird ein Vorzeichen zugewiesen, je nachdem, ob die Eingangsgröße zu groß oder zu klein sein muss, um das berechnete Residuum zu erhalten. Diese Gewichtungen bilden das Expertenwissen eines Prüfstandsingenieurs ab, wie groß die Einflussname verschiedener Messgrößen auf die einzelnen Modelle ist. Diese Hilfestellung kann dann online auch dem unerfahrenen Prüfstandsfahrer mitgeteilt werden, um ihn bei der Fehlersuche zu unterstützen.

Ein Beispiel:

Der Vergleich von Lambda Luft/Kraftstoff zu Lambda Sondensignal ergibt ein Residuum, das über der methodenspezifischen Toleranzschwelle liegt.

$$\text{Residuum} = \lambda_{\text{Sonde}} - \frac{\dot{m}_{\text{Luft}}}{L_{\text{Stö}} \cdot \dot{m}_{\text{Brennstoff}}} > \text{Grenzwert} \quad [76]$$

Der Grenzwert kann nur erreicht werden, wenn

- Das Sondensignal zu groß ist Gewichtung = 3
- Die Luftmasse zu klein ist Gewichtung = -3
- Die Brennstoffmasse zu groß ist Gewichtung = 3

Die Gewichtung ist bei allen Größen einheitlich groß, da alle Größen direkt in das Ergebnis eingehen.

Eine andere Gewichtung ergibt sich für die Luftmasse z.B. in der Sauerstoffbilanz, die folgende Struktur aufweist: (a, b, c, d, e sind dabei beliebige Zusatzterme)

$$\text{Residuum} = O_{\text{Eintritt}} - O_{\text{Austritt}} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot (a + b) - (\dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Brennstoff}}) \cdot (c + d + e) \quad [77]$$

Man erkennt sehr schnell, dass sich das Residuum nicht in demselben Maße ändert wie die Luftmasse, da sich der Fehler in der Luftmasse zu großen Teilen kompensiert. Die Luftmasse erhält die Gewichtung +1, wobei das Vorzeichen aufgrund der fehlenden Eindeutigkeit analytisch oder numerisch berechnet werden muss. Werden sämtliche Größen mit den definierten Gewichtungen belegt, so kann die Bewertung in folgender Form vorgenommen werden.

$$p2 = \frac{\sum_{i=1}^k \text{Gewichtung}_{\text{Messgröße}_i}}{3 \cdot \text{Anzahl_fehlerhafte_Modelle}} \quad [78]$$

wobei k die Häufigkeit des Messkanals i innerhalb der fehlerhaften Modelle ist.

Jetzt wird zusätzlich die Information genutzt, ob die Symptome innerhalb der fehlerhaften Methoden stimmig sind oder ob Widersprüche auftreten. Wird zum Beispiel ein Kanal von Methode 1 mit einem Gewichtungswert von -3 belegt, und von Methode 2 mit +3, so kann der entsprechende Kanal kaum Ursache des Fehlers sein.

Es soll aber nochmals darauf verwiesen werden: Der Wert von 1 ist nach der Definition der Wahrscheinlichkeit ein "sicheres" Ereignis [5]. In diesem Fall ist das nicht so. Auch wenn in dieser Formel der Wert von 1 nicht überschritten werden kann, so sind doch Konstellationen denkbar, bei denen ein Messwert zwar den Wert $p=1$ erreicht, aber dennoch nicht Ursache des Fehlers ist. Auf der anderen Seite ist der Wert von $p=0$ tatsächlich das "unmögliche" Ereignis. D.h. Variablen, die nicht in den fehlerhaften Methoden vorkommen, können auch nicht Ursache der Fehlersymptome sein. Auch Kanäle, deren Gewichtungen sich gegenseitig neutralisieren (+3 und -3), können nicht Ursache der Fehler sein.

Für die Einschätzung, ob ein Messkanal Ursache eines Fehlers ist, kann noch die folgende Überlegung angestellt werden:

Wenn ein Messkanal zwar relativ oft in den fehlerhaften Methoden vorkommt, aber auch in den nicht-fehlerhaften Methoden noch einen nennenswerten Einfluss ausübt, dann sinkt die Wahrscheinlichkeit wieder, die Ursache zu sein. Es wird daher noch eine Kennzahl definiert, die die Verwendung in den fehlerhaften Methoden zur Gesamtzahl der Verwendungen in Bezug setzt.

$$p_3 = \frac{\text{Häufigkeit_Kanal_i_in_fehlerhaften_Methoden}}{\text{Häufigkeit_der_Benutzung}} \quad [79]$$

Das Programm sieht vor, bei nur einer erwarteten Ursache alle drei Faktoren zu berechnen und zu kombinieren. Die Gesamtbewertung beträgt demzufolge $p_{\text{ges}} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$. Bei mehreren Ursachen, wo die analytischen Korrekturwerte versagen, wird p_1 zu eins gesetzt, geht folglich nicht in die Rechnung ein.

7 Umsetzung

Die Umsetzung aller genannten Teilaspekte zu einem Gesamtprogramm erfordert noch einiges an Detailarbeit, die in einigen Stichworten hier zusammengefasst werden soll.

7.1 Anbindung an den Prüfstand

Wenn sich der Motortyp nach dem letzten Versuch nicht geändert hat, bedarf das Programm keinerlei Informationen als die Namen und Einheiten der Messkanäle sowie die Messwerte selbst mit einer Datenrate von 1Hz.

Das Programm ist folglich ein reiner Beobachter. Rückwirkungen und Reaktionen auf den Prüfstandsbetrieb sind bislang nicht verwirklicht worden. Mit diesen Arbeiten ist allerdings schon begonnen worden. Voraussetzung für diese Funktionalität ist die beschriebene Fehlerisolation.

Wenn z.B. Fehler im Abgassystem detektiert werden, so kann eine automatisierte Kalibrierung oder Spülung der Anlage ausgelöst werden. Auch die Kraftstoffverbrauchsmessung kann bei entsprechenden Fehlermeldungen automatisiert kalibriert oder neu gestartet werden. Diese Gedanken werden immer wichtiger, da der Anteil an personalfreien Prüfständen im Automatikbetrieb stetig steigt.

Die Software wird hierbei vorzugsweise direkt in das Messdatenerfassungssystem integriert, da ein ungleich höherer Kommunikationsaufwand zwischen Diagnosesoftware und Prüfstand nötig ist.

7.2 Parametrierung

Eine der Voraussetzungen des Projektes war, ein Programm mit minimalem Parametrieraufwand zu erarbeiten. Zu hoher Parametrieraufwand führt zwangsläufig zu fehlender Akzeptanz im Prüffeld und steht damit einer breiten Einführung im Wege.

7.2.1 Notwendige, im Voraus zu bedatende Größen

Neben den grundlegenden Motordaten wie Hub, Bohrung, Verdichtung und Zylinderzahl ist noch die Eingabe erforderlich, um welchen Motortyp es sich handelt. Unterschieden wird nach Otto- und Dieselmotoren sowie nach aufgeladenen oder unaufgeladenen Motoren. Die Maximaldrehzahl ist die einzige Größe, die auf den Charakter des Motors hinweist. Sie dient zur Abschätzung verschiedener Geometrien.

Da diese Informationen ohnehin in der Prüfstandssoftware vorliegen, ist also keinerlei zusätzlicher Eingabeaufwand notwendig.

Für die Abgasmessgeräte ist eine Angabe nötig, die eine Unterscheidung zwischen trockenen und feucht gemessenen Konzentrationen ermöglicht. Diese Information kann nicht generiert werden und bedarf einer manuellen Eingabe. Ebenso verhält es sich mit den Kraftstoffdaten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Eingabe einmalig erfolgt. Weder die Abgastürme noch die Kraftstoffsorte ändert sich in nennenswerten Zeiträumen, sondern bleiben meist über Wochen oder Monate konstant.

Aufgrund logischer Zusammenhänge kann die Korrektur der Drücke vorgenommen werden. Für physikalische Methoden ist stets nur ein Absolutdruck interessant. Viele Drücke werden allerdings nur relativ zur Umgebung gemessen.

Hier hilft die Beobachtung der Drücke in der stationären Funktionsprüfung. Wie schon dargelegt, ist das Ergebnis des Wertevergleichs bei Motorstillstand zum einen ein sehr genauer Umgebungsluftdruck, zum anderen erhält man gleichzeitig die Information, welche Drücke noch einer Korrektur bedürfen.

Als Handeingabe bleiben folglich nur die Parameter zur Feuchtekorrektur, ein Hinweis auf den Motortyp und die Kraftstoffdaten übrig. Der Zeitaufwand beträgt bei entsprechender Routine weniger als eine Minute.

7.2.2 Parametrierung der Prüfaufgabe

Bleibt die Aufgabe nach der Parametrierung der Prüfaufgabe selbst. Für jeden Versuch muss definiert werden, welche Methoden sich mit den gegebenen Messkanälen überhaupt verwirklichen lassen, und welche Methoden sich für den angegebenen Motortyp eignen.

Diese Frage wurde dem Prüfpersonal abgenommen. Bei einer Liste von 83 Methoden und Vergleichen, die jederzeit erweiterbar ist, kann diese Aufgabe dem Prüfpersonal nicht zugemutet werden. Eine sachliche Auseinandersetzung mit den Formeln setzt außerdem eine fundierte Sachkenntnis der Thematik voraus, die sicherlich teilweise vorliegt, aber nicht zu den bisherigen Betätigungsfeldern des entsprechenden Personals gehörte.

Daher ist dem Programm eine Logik in Form eines eigenen Konfigurationsprogramms mitgegeben, das selbstständig nach den korrekten Kanalbelegungen für jede einzelne Methode sucht. Wenn eine Methode zum Motortyp und zu den Messdaten passt, dann wird sie automatisch aktiviert.

Methoden, die mit den Messgrößen nicht realisiert werden können, bleiben inaktiv und stören den weiteren Prüfbetrieb nicht.

Gleichzeitig ist klar, dass eine anspruchsvolle Fehlerdetektion nur mit einer möglichst hohen Anzahl aktiver Methoden funktionieren kann. Daher geht die Logik so weit, bei Nichtvorhandensein verschiedener Größen automatisch nach Ersatzgrößen zu suchen.

Ein Beispiel:

Für die Berechnung des Druckverlustes über Ladeluftkühler (LLK) ist ein Luftmassenstrom nötig.

$$\Delta p = \xi_{LLK} \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \quad [80]$$

wobei v aus der Kontinuitätsgleichung gewonnen werden kann. In diese geht dann wiederum eine Luftmasse ein.

$$v = \frac{\dot{m}_{Luft}}{\rho \cdot A} \quad [81]$$

Für die Analyse des Ladeluftkühlers ist es nun völlig gleichgültig, woraus die verwendete Luftmasse generiert wird. Für das genannte Beispiel sind drei Alternativbelegungen möglich.

- Die Luftmasse als Messgröße
- Die Luftmasse wird berechnet aus einem Lambdasondenwert und dem Kraftstoffverbrauch
- Die Luftmasse wird aus den Abgasgrößen und dem Kraftstoffverbrauch berechnet

Der Kraftstoffverbrauch kann wiederum entweder aus einem externen Messgerät oder der motoreigenen ECU stammen.

Diese Arbeit, die Selektion von Messgrößen und wahlweisen Ersatzgrößen, kann nur der Rechner selbst zuverlässig durchführen. Es ist weiterhin sicherzustellen, dass auch die Fehlerisolation mit den entsprechenden Informationen versorgt wird. Ansonsten ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte unmöglich.

So kommt es vor, dass nicht mehr die gemessene Luftmasse potentielle Fehlerquelle ist, sondern die Zusammensetzung des Abgases, und das bei einem Druckverlustmodell über LLK. Es entsteht also ein Geflecht von Hintergrundinformationen, ohne die das Programm nicht zuverlässig arbeiten kann.

Natürlich bleibt es dem Prüfstandsfahrer überlassen, einzelne Methoden von Hand zu deaktivieren, d.h. er bleibt wichtigste Instanz am Prüfstand. Dies ist wiederum ganz wichtig für die Einführung eines solchen Systems.

Bezüglich des Parametrieraufwandes ist somit das Ziel erreicht worden.

7.3 Ausgabe

Die Prüfstandsdiagnose, die ja unter dem Aspekt minimalen Zusatzaufwands für den Prüfstandsfahrer entwickelt wurde, erlaubt nur sehr begrenzte Bedienmöglichkeiten.

Nach dem Hochfahren aller Rechner und dem Einschalten und Kalibrieren der Messgeräte erfolgt zunächst die statische Funktionsprüfung bei kaltem Motor, dem so genannten Kalttest. Die Ergebnisse dieses Tests können direkt in das Meldungsfenster auf derselben Oberfläche eingetragen werden. Im Fehlerfall hat der Prüfstandsfahrer dies zu quittieren oder die entsprechenden Fehler zu beheben.

Die Taste "Warmtest" startet die Online-Diagnoseverfahren, wahlweise die Beharrungserkennung und die Fehlerisolation.

Im laufenden Prüfbetrieb ist zunächst einmal eine Datenflut zu vermeiden, die den Prüfstandsfahrer unnötig belastet. Von den vielen generierten Größen ist zunächst einmal ausschließlich von Interesse, ob ein Fehler vorliegt oder nicht.

Im Fehlerfall muss natürlich auch nachvollziehbar sein, welche Methoden den Fehler detektiert haben, wie groß dieser ist und welche Ursachen dafür verantwortlich sein könnten. Diese Informationen können allerdings teilweise nur von sachkundigem Personal bewertet werden, weswegen sie in eine zweite, tiefer liegende Ebene abgelegt sind.

Am Ende des Tests oder zur genaueren Analyse während der Messung ist es weiterhin von großer Hilfe, sich die methodenspezifischen Ergebnisgrößen ansehen zu können. Hierzu ist eine eigene Grafikauswertung notwendig, die eine schnelle und übersichtliche Ausgabe der Einzelmethode ermöglicht. Die Rechengrößen der Methoden, die Residuen oder andere wichtige Schlüsselgrößen sind dabei über alle Messpunkte aufgetragen. Damit können sehr schnell driftende Messgeräte oder Sprünge innerhalb des Tests analysiert werden, selbst wenn sie innerhalb der Toleranz liegen und keine Fehlermeldung verursacht haben.

Des Weiteren können am Ende der Messung automatisch statistische Grafiken zu Ausfallhäufigkeiten, Detektionsraten der Methoden oder Fehlerübersichten erstellt werden.

Auf der ersten Oberfläche im Online-Prüfbetrieb wird das Diagnoseergebnis in Form zweier sehr einfacher, plakativer Signallampen dargestellt. Eine signalisiert den Beharrungszustand des Motors, die andere die Richtigkeit der Daten.

Es muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass der Bediener eventuell die selbstständige Aufmerksamkeit über die Güte der Messdaten verliert, da das Programm ja ohnehin danach schaut.

Daher wird auf derselben Oberfläche thematisch zusammengefasst, welche Fehlergebiete gerade überwacht werden können. Die Möglichkeiten der Diagnose sind einzig von der Ausstattung mit Messkanälen abhängig. Fehlen wertvolle Schlüsselgrößen wie CO₂, Luftmasse oder Kraftstoffverbrauch, so fallen die

wichtigsten Fehleranalysemethoden weg. Der Prüfstandsfahrer muss in diesem Falle selbst aufmerksamer die Messung verfolgen.



Abbildung 7.1: Bildschirmausgabe I

Tritt wie auf der obigen Darstellung illustriert ein Fehler auf, d.h. die entsprechende Signallampe schaltet auf rot, besteht die Möglichkeit einer genaueren Analyse.

Hierzu kann die Schaltfläche "Details" aktiviert werden, die den Zugang zu den Einzelmethode freigibt.

In dieser Detailschaltfläche werden zunächst einige Randinformationen zum Test ausgegeben. Dies beinhaltet neben der Anzahl der identifizierten Kanäle die Anzahl der aktiven Methoden, den zugrunde gelegten Motortyp als auch die aktuellen Kraftstoffdaten. Damit wird sehr schnell klar, ob es sich bei den Fehlermeldungen um Parametrierfehler oder um echte Mess- oder Bauteilfehler handelt.

Darunter befindet sich ein Meldungsfenster, in dem alle fehlerhaften Einzelmethode mit kurzer Fehlerbeschreibung aufgeführt sind. Der versierte Prüfstandsfahrer kann daran sehr schnell erkennen, wo sich das Problem befindet.

Direkt daneben wird das analytisch generierte Fehlerisolationsergebnis dargestellt. Anhand des Farbcodes wird sofort klar, welche Größe für den Fehler verantwortlich ist. Rot hinterlegte Kanäle besitzen eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit, grün hinterlegte Kanäle sind zwar in den fehlerhaften Methoden beteiligt, jedoch sehr wahrscheinlich nicht Ursache der Unstimmigkeiten.

Als weitere Informationsquelle steht dem Benutzer eine Methoden-Kurzinformation mit grafischen- und textbasierten Hilfestellungen zur Verfügung. Damit werden unter Umständen schwer verständliche Fehlermeldungen transparent dargelegt. Weiterhin steht eine grafische Auswertemöglichkeit zur Verfügung, die allerdings eine eigene Oberfläche erfordert.

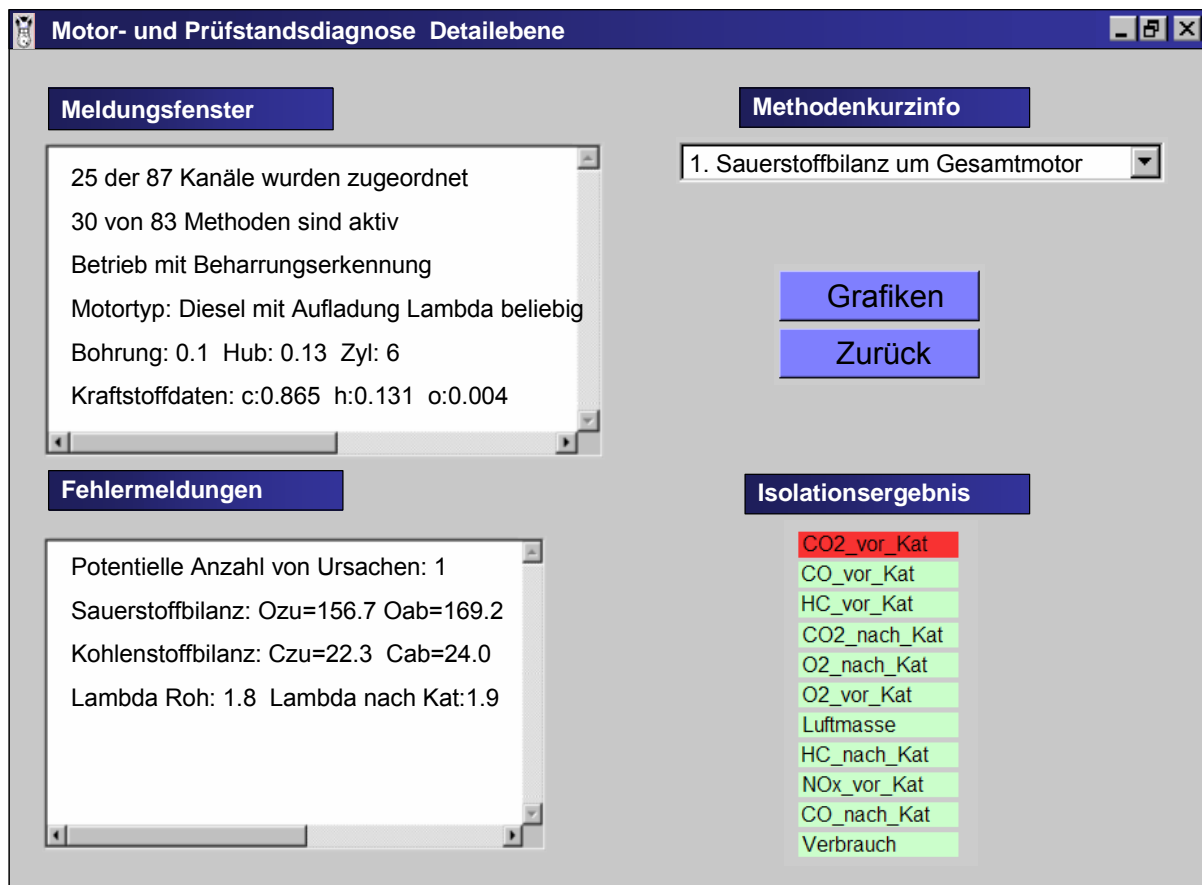


Abbildung 7.2: Bildschirmausgabe II

Die Grafikauswertung zeigt in Abhängigkeit der ausgewählten Methode die dort generierten Ergebnisgrößen. Dies ist meist der Vergleich zwischen Mess- und Rechengröße, zwischen zu- und abgeführter Energie und dergleichen. Begleitet wird diese Darstellung durch die Größe der Residuen und die gewählten Fehlerschwellen. Zur Dokumentation oder zur Anforderung von Hilfe, z.B. beim verantwortlichen Prüflingenieur, können die Bilder automatisch gedruckt werden. Die Idee dahinter ist die folgende, dass die Informationen dem verantwortlichen Ingenieur dicht gepackt zugesandt werden können, und dieser dann im Zweifelsfalle über den weiteren Testfortgang entscheidet.

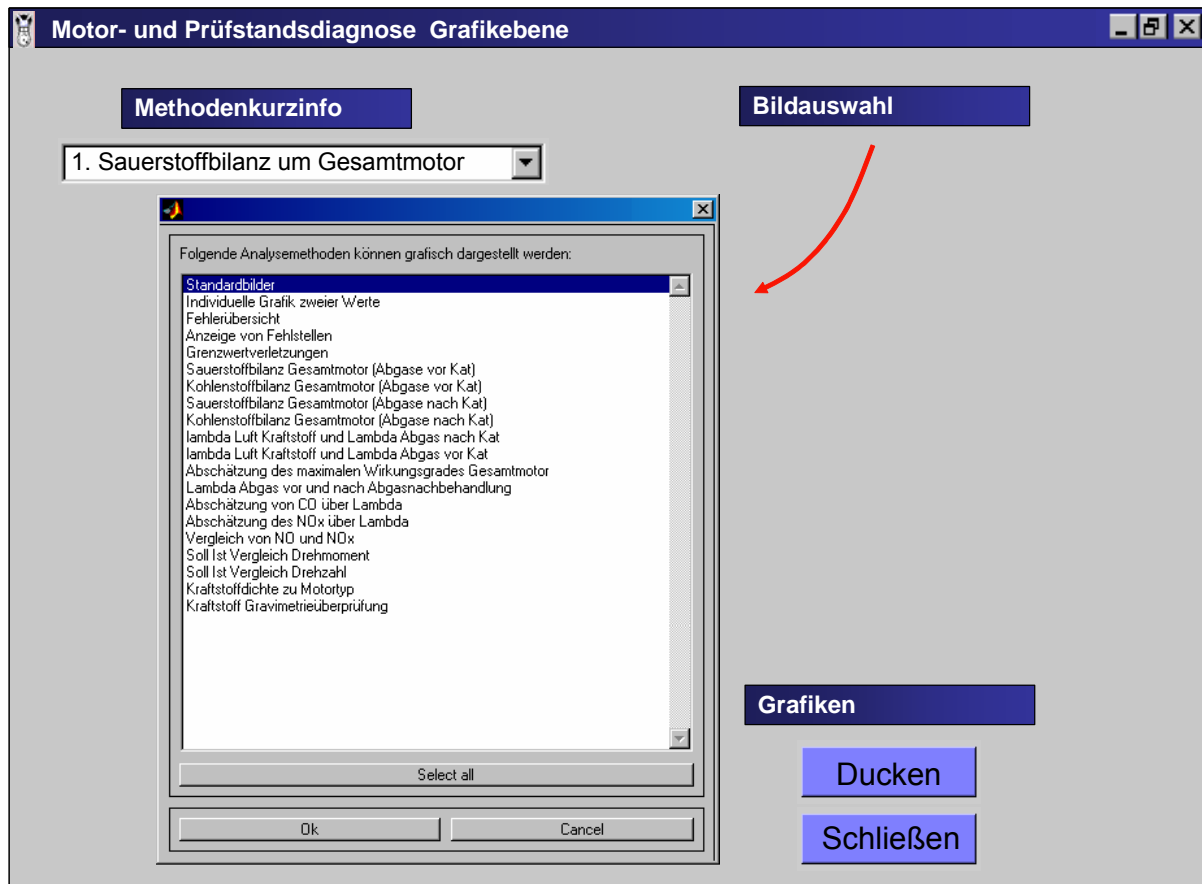


Abbildung 7.3: Bildschirmausgabe III

Neben der zunächst sehr plakativen Ausgabe in der Ebene 1 sind dem Prüfstandsfahrer und dem Prüflingenieur somit auch noch eine Reihe tiefergehender Informationen gegeben, die in den meisten Fällen zu einer schnellen Überprüfung der Messdatengüte führen.

8 Leistungsfähigkeit des Verfahrens

Um die Qualität der Diagnose zu testen, wurden 2 Messpunkte, die nachweislich fehlerfrei waren, synthetisch mit Fehlern verschiedener Größe und Vorzeichen belegt. Es entstanden zwei Testdatensätze, einer eines Ottomotors, ein anderer von einem Dieselmotor. Als Detektionsrate wird das Verhältnis von aufgespürten Fehlern zu vorhandenen Fehlern definiert

$$\text{Detektionsrate} = \frac{\sum \text{gefundene_Fehler}}{\sum \text{vorhandene_Fehler}} \quad [82]$$

Die Isolationsrate sagt aus, ob bei einem gefundenen Fehler auch die richtige Ursache isoliert wird

$$\text{Isolationsrate} = \frac{\sum \text{richtig_isolierte_Ursachen}}{\sum \text{gefundene_Fehler}} \quad [83]$$

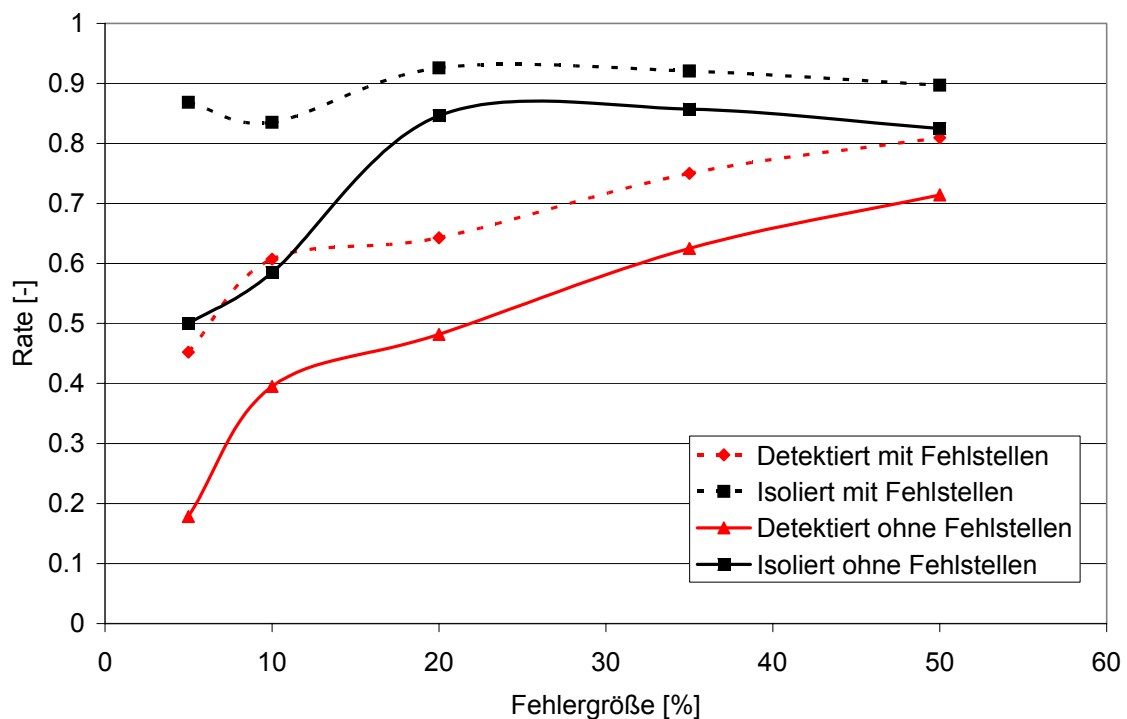


Abbildung 8.1: Detektions- und Isolationsraten Otto

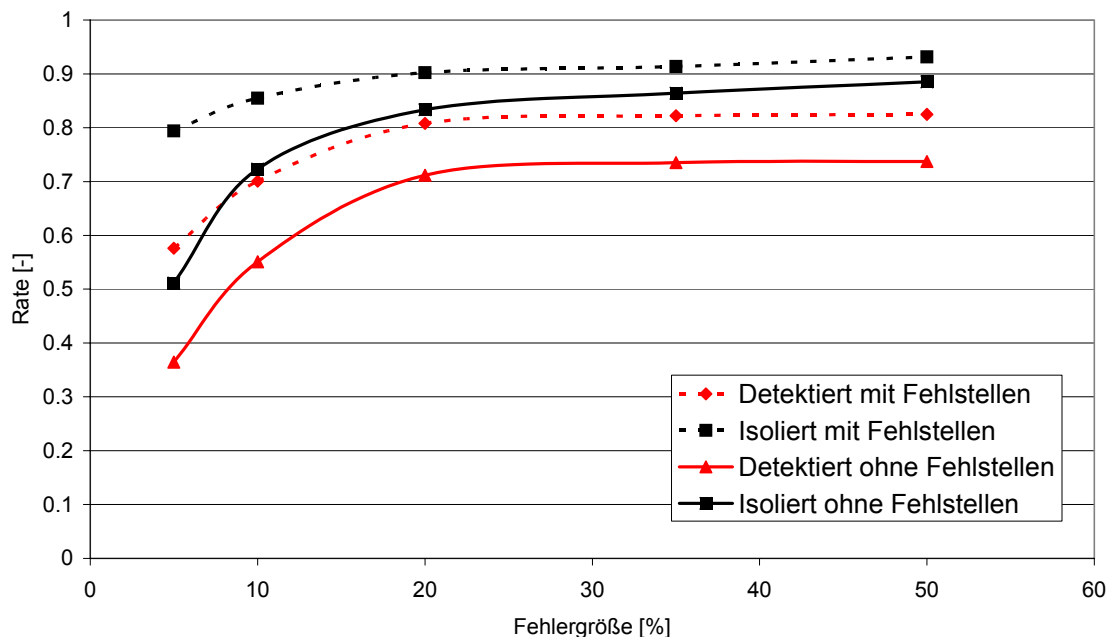


Abbildung 8.2: Detektions- und Isolationsraten Diesel NFZ

Der Sensortotalausfall ist in dieser Betrachtung ein Sonderfall, da dessen Nachweis trivial ist. Detektion als auch Isolation machen hierbei keinerlei Probleme. Daher sind auch alle Ergebnisse ohne Fehlstellen (o.F.) dargestellt.

Entstanden sind die Daten in einem mittleren Lastpunkt an einem NFZ-Dieselmotor, ebenso an einem PKW Ottomotor neuester Bauart.

Beide Motoren sind mit allen gängigen Kanälen ausgestattet, die auch in der Datenbank vorkommen. Nicht vermessene Kanäle wurden nachträglich berechnet und angefügt, um ein möglichst umfassendes Bild der Leistungsfähigkeit zu erhalten.

Die Variation bestand in dieser Betrachtung für jeden Messkanal in einer prozentualen Veränderung nach oben als auch nach unten. Bei Fehlergrößen von 5% werden bei den meisten Modellen die Fehlerschwellen noch nicht überschritten, weswegen hier die Detektionsrate noch sehr gering ist. Bei 15% Fehler sprechen die meisten Bilanzmodelle als auch die empirischen Modelle an, wodurch ein starker Anstieg in der Detektionsrate zu verzeichnen ist. Der weitere Anstieg ist relativ flach. Der Grund ist darin zu sehen, dass in diesem Bereich die sehr einfach strukturierten Ungleichungen zur Kontrolle von Drücken und Temperaturen hinzukommen, die aber auch nur in einer Richtung einen Fehler nachweisen können. Ein steiler Anstieg ist erst wieder für sehr große Fehler zu erwarten, wenn die Grenzwerte aus der Datenbank überschritten werden. Dann steigen Detektion als auch Isolation auf 100% an.

Die Isolationsrate ist bei Fehlern >15% stets über 80% und somit als gut zu bezeichnen. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse für die

Grenzwertbetrachtung als auch für die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung annähernd gleich sind, obwohl sich der Rechenaufwand beider Methoden deutlich unterscheidet.

Der Vorteil bei der komplizierteren Berechnung ist darin zu sehen, dass die tiefergehende Fehleranalyse mit den berechneten Grenzwerten deutlich hilfreicher ist. Die Interpretation dieser Werte erfordert allerdings bislang einen Experten, der sich mit der Physik der Modelle auskennt und die Werte damit zu deuten weiß.

Der Prüfstandsbediener erhält als Ergebnis im vorliegenden Prototypen eine Liste von Messgrößen, die alle potentiell Ursache des Fehlers sein könnten. Jede Messgröße ist entweder rot oder grün hinterlegt, je nachdem wie groß die Fehlerwahrscheinlichkeit der entsprechenden Größe ist.

Der Vorteil der vorgestellten Methode ist die Flexibilität, mit der beliebige Kombinationen von Analysemethoden und Messkanalkombinationen ausgewertet werden können. Bei ausreichend großen Fehlern und ausreichender Modellanzahl ist die Isolationsrate gut. Um die Detektionsrate spürbar zu steigern, bringt eine höhere Auflösung entgegen erster Vermutungen nicht viel, da die meisten Fehler nicht Bauteilfehler sondern tatsächlich Messgerätefehler sind. Diese lassen sich aber auch durch Einzelarbeitsspielanalysen o.ä. nicht besser erkennen als durch Mittelwertbetrachtungen.

9 Zusammenfassung / Ausblick

Mit den erarbeiteten Verfahren ist es möglich, eine ganze Reihe von Fehlern an Motorenprüfständen zu detektieren, und damit die Qualität der Messdaten reproduzierbar zu steigern. Die Fehlermeldungen sensibilisieren den Prüfstandsfahrer, sich der Güte und Genauigkeit der Daten etwas intensiver zu widmen.

Neben empirischen und logischen Überprüfungen im Motorstillstand, die bereits erste Ungenauigkeiten in vielen wichtigen Messkanälen aufdecken können, sorgt vor allem eine Vielzahl von Einzelüberprüfungen bei laufendem Motor dafür, dass die störendsten Fehler im alltäglichen Prüfbetrieb schneller entdeckt werden können als bisher.

Durch die geringe Anzahl von Systeminformationen eignen sich für die Diagnose der Daten nur grundlegende Zusammenhänge, basierend auf chemischen und physikalischen Zusammenhängen. Empirische Modelle und neuronale Netze können zwar in wenigen Fällen durchaus eingesetzt werden, allerdings bleibt deren Einsatzgebiet eher der bereits vermessene Motor. Im Falle der angestrebten Allgemeingültigkeit fällt die Genauigkeit sehr schnell in wenig Erfolg versprechende Regionen ab, womit die physikalisch basierten Modelle wieder an Bedeutung gewinnen.

Neben einzelnen falschen Messwerten durch Fehlkalibrierung oder Sensordefekt, für deren Detektion die Methoden konzipiert waren, konnten auch einige Bauteilfehler oder falsch montierte Sensoren im Laufe der Entwicklung entdeckt werden.

So konnten z.B. auch eine durch Leckage aufgetretene Ölverdünnung, mechanisch defekte Bremsenregler und falsch positionierte Ansaugtemperatursensoren mittels der Diagnosemethoden detektiert werden.

Und obwohl der Isolationsmechanismus nur von fehlerhaften Messsignalen und gerade nicht von Bauteilfehlern ausgeht, so bot sich doch durch die generierten Hilfsmittel und Rechengrößen eine wirksame Hilfestellung, mittels derer die tatsächlichen Fehler entdeckt werden konnten.

Bislang ist die Software in Matlab geschrieben und läuft auf einem separaten Prüfrechner. Dieser Umstand ist in den folgenden Softwareversionen zu ändern, da sich gezeigt hat, dass die Diagnose im Messdatenerfassungsrechner besser integriert werden kann. Damit können in Zukunft mehrere Vorteile erreicht werden:

- Die Kommunikation mit der Messdatenerfassung fällt deutlich leichter
- Die Beschaffung von Informationen, sei es über AK-Protokoll oder andere Schnittstellen, ist damit deutlich einfacher umzusetzen
- Durch den Wegfall einer limitierenden Schnittstelle kann eine höhere Datenerfassungsrate analysiert werden, womit die Diagnose der Rohsignale aufgrund statistisch basierter Diagnoseverfahren einen höheren Aussagewert erhält. Dies ist gerade deswegen interessant, da ein namhafter Hersteller gerade Prüfstandsysteme mit Erfassungsraten bis zu 1 kHz im Markt eingeführt hat.
- Im Hinblick auf den vollautomatischen Prüfstand wird immer häufiger die Forderung nach automatisierten Reaktionen der Prüfstandssteuerung auf entsprechende Fehlermeldungen laut. Die Ideen reichen von versendeten Benachrichtigungen über Kalibrierungen, Korrekturen und Neustart des Tests, basierend auf logischen Schlüssen des Diagnosesystems.

10 Anhang

10.1 Feuchtekorekturen nach EU-Norm und empirischer Formel

Die in [12] gezeigte Feuchtekorrektur ist ein rein empirischer Zusammenhang, der die Feuchtekorrektur in Abhängigkeit des Luft-Kraftstoffverhältnisses darstellt. Für eine spezielle Kraftstoffzusammensetzung liefert diese Gleichung für Bereiche mit $\lambda > 1$ gute Werte. Der Rechenaufwand ist sehr gering.

$$\text{Korrekturwert} = 1 - 1.85 \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}}{\dot{m}_{\text{Luft}}} \quad [84]$$

Die Berechnungsvorschrift für Dieselmotoren nach [33] wird im Folgenden dargestellt, die Berechnung ist hierbei etwas komplexer. Die Berechnung ist der oben dargestellten Gleichung sehr ähnlich, jedoch erfolgt diese über zwei Zwischengrößen, die zunächst ermittelt werden müssen.

$$\text{Korrekturwert} = \left(1 - F_{FH} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}}{\dot{m}_{\text{Luft}}} \right) - KW_2 \quad [85]$$

$$F_{FH} = \frac{1.969}{\left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}}{\dot{m}_{\text{Luft}}} \right)} \quad [86]$$

$$KW_2 = \frac{1,608 \cdot H_a}{1000 + (1,608 \cdot H_a)} \quad [87]$$

$$H_a = \frac{6,22 \cdot R_a \cdot p_a}{p_B - p_a \cdot R_a \cdot 10^{-2}} \quad [88]$$

Hierbei bedeuten:

p_a : Sättigungsdampfdruck der Ansaugluft in kPa

p_b : barometrischer Gesamtdruck in kPa

R_a : relative Feuchtigkeit der Ansaugluft in %

Der Sättigungs-Dampfdruck [Pa] als Funktion der Temperatur [°C] kann mittels der so genannten Magnus-Gleichung abgeschätzt werden.

$$p_a(T) = 611.15 \cdot 10^{\frac{7.602 \cdot T}{241,2 + T}} \quad [89]$$

10.2 Technische Daten der Dieselmotoren des Abgastemperaturmodells

Nr.	Motortyp	Hub / Bohrung [cm]	Zylinder- anordnung [-]	Hub- raum [l]	Leistung / Drehzahl [kW/1/min]
1	Mercedes OM906 (NFZ)	13,4 / 10	R6	6.03	220/2200
2	Mercedes OM904 (NFZ)	13,4 / 10	R4	4.02	136/2200
3	Mercedes OM501 (NFZ)	15 / 13	V6	11.95	300/1800
4	Volkswagen 1.4 TDI	9.55 / 7.95	R3	1.42	51/4000
5	Peugeot PSA DW12	9.6 / 8.5	R4	2.2l	98/4000
6	Volkswagen 1.9 TDI	9.55 / 7.95	R4	1.9	75/4000
7	Volkswagen 2.5 TDI	9.55 / 8.1	R5	2.5	128/3500
8	Mercedes OM501 (NFZ) Ladervariation EU2	15 / 13	V6	11.95	300/1800

11 Literaturverzeichnis

- [1] Adler, U.
Motormanagement Motronic
Technische Unterrichtung, Robert Bosch GmbH, 1995
- [2] Automotive Handbook, 6. Auflage
Robert Bosch GmbH, 2004
- [3] AVL List GmbH Graz
Indicom Produktdokumentation, 2001
- [4] Bosch Technische Berichte
Heft 56, 1994
- [5] Bronstein, S. & Mühlig, M.
Taschenbuch der Mathematik
Verlag Harry Deutsch, 1997
- [6] Christ, C.
Schulungsunterlagen zum DoE-Seminar
AVL Deutschland GmbH, 2005
- [7] Demuth, H. & Beale, M.
Neural Network Toolbox users guide
Math Works, 1998
- [8] Fehl, G.
Entwicklung einer alternativen Messstrategie
Dissertation, TU-Darmstadt, 1998
- [9] Ferguson, T.B.
The Centrifugal Compressor Stage
Butterworths, London, 1963
- [10] Freyermut, B.
Wissensbasierte Methoden zur Fehlerdiagnose
VDI-Verlag 1994
- [11] Freyermut, B.
Wissensbasierte Fehlerdiagnose am Beispiel eines Industrieroboters.
Dissertation TU-Darmstadt, VDI-Verlag, 1993
- [12] Gärtner, U.
Die Simulation der Stickoxyd-Bildung in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren
Dissertation TU-Darmstadt, 2001
- [13] Gerstle, M.
Simulation des instationären Betriebsverhaltens hochaufgeladener
Vier- und Zweittakt-Dieselmotoren

- [14] Gravdahl, J.T.
Compressor Surge and Rotating Stall
Springer Verlag, 1999
- [15] Heuer, T.
Modellierung des Wärmeflusses im und am System Turbolader
FVV Zwischenbericht Nr. 755, 2002
- [16] Henneke, D. K.
Skriptum Flugantriebe
TU-Darmstadt 1998
- [17] Hohenberg, G.
Visionen zu einem Motorenprüfstand für das 21. Jahrhundert
Haus der Technik, Tagung, Essen, 1999
- [18] Hohenberg, G.
Skript Verbrennungskraftmaschinen
TU-Darmstadt, 2005
- [19] Isermann, R.
Modellgestützte Steuerung Regelung und Diagnose von
Verbrennungsmotoren
Springer Verlag, 2003
- [20] Isermann, R.
Überwachung und Fehlerdiagnose
VDI Verlag, 1994
- [21] Kleppmann, W.
Taschenbuch Versuchsplanung
Hanser Verlag, 1998
- [22] Kimmich, F.
Modellbasierte Fehlererkennung und Diagnose der Einspritzung und
Verbrennung von Dieselmotoren
Dissertation TU-Darmstadt, 2003
- [23] Merker, G.P.
Technische Verbrennung, motorische Verbrennung
B.G.Teubner Verlag, Stuttgart, 1999
- [24] More, F.K. & Greizer, E. M.
A Theory of post Stall Transients in Axial Compression Systems
ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986
- [25] Pampreen, R.C.
Small Turbomachinery Compressor and Fan Aerodynamics
Journal of Engineering for Power, 1973

- [26] Pfeleiderer, C.
Strömungsmaschinen
Springer Verlag, 1967
- [27] Pischinger, R. et. Al.
Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine
Springer Verlag, 2002
- [28] Pucher, H. & Seume, J.
Erweiterte Darstellung und Extrapolation von Turbolader-Kennfeldern als
Randbedingung der Motorprozesssimulation,
FVV-Bericht 754, 2002
- [29] Schwarte, A.
Modellgestützte Fehlerdiagnose des Ansaugsystems eines Dieselmotors.
Tagungsband Vortrag Haus d. Technik, Darmstadt, 2002
- [30] Stoffel, B.
Turbomaschinen
Skript, TU-Darmstadt, 2002
- [31] Schwarz, C
Simulation des transienten Betriebsverhaltens von aufgeladenen
Dieselmotoren, Dissertation TU München, 1993
- [32] Theotokatos, G. & Kyrtatos, N.P.
Diesel Transient Operation with Turbocharger Compressor Surging
SAE Paper 2001_01_1241, 2001
- [33] Vereinheitlichung der Abgas-Mess- und Prüfverfahren
EU Richtlinie 88/77/EWG, Dez. 1999
- [34] Wagner, W.
Strömung und Druckverlust
Vogel Fachbuch, 2001
- [35] Warnatz, J. & Maas, U. & Dibble, R.W.
Verbrennung
Springer Verlag, 2001
- [36] Watson, N. & Janota, M.S.
Turbocharging the Internal Combustion Engine
Mac Millan, 1982
- [37] Wember, T.
Technische Statistik und statistische Versuchsplanung
P&P Informationstechnologie GmbH
- [38] White, F.M.
Fluid Dynamics
Mc Graw-hill, New York, 1986

- [39] Wörrlein, K.
Seminar in Flugantriebe
TH-Darmstadt, 1992
- [40] Wysotzky, F.
Maschinelles Lernen
Skriptum Institut für angewandte Informatik, TU Berlin, 2001
- [41] Zell, A.
Simulation neuronaler Netze
Addison Wesley Longmann Verlag, 1994
- [42] Zinner, K.
Aufladung von Verbrennungsmotoren
Springer Verlag, 1985

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Andreas Flohr
Anschrift: Am Kolmbach 30, 64678 Kolmbach
Geburtsdatum: 26.06.1974 in Zweibrücken
Familienstand: ledig, 1 Kind

Schulische Ausbildung

Bis 6/1993 Abschluss Abitur am Martin Luther Gymnasium in Rimbach

Zivildienst

7/1993 - 10/1994 Werkstattdienst im Kreiskrankenhaus Weinheim

Studium

10/1995 - 10/2000 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus
an der Technischen Universität Darmstadt
Schwerpunkte:
- Verbrennungskraftmaschinen
- Strömungslehre

Beruf

11/2000-11/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Hohenberg am
Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen, TU Darmstadt
Arbeitsgebiete:
- Fehlerdetektion und Isolation an Motorenprüfständen
- Modellbildung von Turboladern
- Aufbau und Untersuchung von Konditionieranlagen
- Untersuchung von DPF an NFZ - Motoren
- Untersuchungen zur kontinuierlichen Messstrategie CMS